

Міністерство освіти та науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

На правах рукопису  
УДК 621.74.043.2

**Антоневич Ярослав Казимирович**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ З  
ОРГАНІЗАЦІЄЮ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ВИЛИВКІВ У ЗАМКНЕНОМУ  
РЕЖИМІ**

С п е ц і а л ь н і с ь т ь – 05.16.04.

Ливарне виробництво

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. МАШИНА ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ.....	10
1.1. Загальний опис процесу ЛПТ .....	10
1.2. Параметри, що контролюються та існуючі методи їх контролю .....	21
1.2.1. Методи контролю температури металу.....	21
1.2.2. Спосіб контролю зусилля запирання за натягненням колон ....	22
1.2.3. Методи контролю операцій пресування та підпресування.....	24
1.2.4. Контроль тиску пресування.....	28
1.2.5. Зміна температурних параметрів.....	29
1.2.6. Системи комплексного вимірювання параметрів процесу.....	35
1.2.7. Сучасні закордонні системи комплексної автоматизації для машин ЛПТ.....	39
Висновки до розділу.....	46
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	47
2.1. Характеристика устаткування.....	47
2.2. Характеристика виливків та обладнання для дослідження хімічного складу та структури.....	48
2.3. Обробка даних.....	50
3. СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ. ПІДСИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ЯК СКЛАДОВІ ЧАСТИНИ АСКТП. ....	60
3.1. Формулювання критерію якості керування .....	60
3.2. Підсистема керування дозуванням розплаву.....	69
3.3. Підсистема керування температурними параметрами процесу.....	83
3.3.1. Температурний режим ванни плавильної печі.....	83
3.3.2. Регулювання температури прес-форми.....	96
3.4. Підсистема регулювання зусилля запирання.....	106
3.5. Підсистема регулювання швидкості прес-поршня.....	118
Висновки до розділу.....	123
4. СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ.....	125

4.1. Інформаційна АСУ машинами ЛПТ .....	126
4.2. Багатоконтурна система керування машиною лиття під тиском.....	130
4.3. Керування білямашинами операціями комплексу ЛПТ.....	151
4.4. Дослідження структури та хімічного складу отриманих зразків, економічна ефективність.....	156
ВИСНОВКИ .....	161
Література.....	164
Додатки	

## **Перелік символів, скорочень, одиниць та умовних позначень**

ЛПТ – лиття під тиском;

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ДСП – державна система приладів;

ФЕВ – щілинний фотоелектричний вимикач;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;

ІТП – індукційна тигельна піч;

ЗРМ – залишок рідкого металу;

Re – критерій Рейнольдса;

St – критерій Стентона;

Pr – критерій Прандля;

Pd – критерій Предводителя;

Fo – критерій Фур'є;

МДН – магнітний динамічний насос;

ЗОР – змащуюча охолоджуюча рідина;

БК – безконтактний датчик.

## **ВСТУП**

Процес лиття під високим тиском (ЛПТ) – найбільш перспективний спосіб виробництва виливків, що піддається автоматизації, завдяки тому, що все технологічне устаткування повністю механізоване і підготовлене для функціонування у складі автоматизованих систем керування технологічним процесом (АСКТП). Головні його переваги – можливість отримання заготовок з мінімальними припусками на механічну обробку і мінімальною шорсткістю поверхонь, що не оброблюються, забезпечення високої продуктивності й низької трудомісткості виготовлення деталей.

Зміни параметрів металу, що заливається і роботи устаткування призводять до погіршення якості виливків і збільшення кількості повернених виробів. Одночасна стабілізація декількох параметрів неможлива без автоматизації процесу. На підприємствах галузі за відсутності АСКТП значна частина виливків відразу після первинного огляду оператором переплавляється повторно через наявність дефектів, що спричиняє підвищення витрат, зниження продуктивності та зміни параметрів процесу.

Покращити якість виливків повністю в ручному режимі неможливо через велику кількість параметрів, що контролюються, та їх взаємний вплив на перебіг процесу. Передовими закордонними і вітчизняними виробниками постійно створюються та вдосконалюються системи керування процесом. Закордонні системи орієнтовані на високу якість вихідних матеріалів, точно підлаштовані під певний тип машини ЛПТ, мають більш вузькі межі регулювання та налаштувань. Впровадження таких систем неможливе на вже працюючих машинах та недостатньо підлаштоване до вітчизняного виробництва. Вітчизняні ж, як правило, орієнтовані на стабілізацію окремих параметрів процесу лиття незалежно один від одного. Тому постає необхідність розробки комплексної моделі, що працює за єдиним критерієм оптимальності, та створення на її базі замкненої системи керування процесом з мінімальною участю людини при виробництві. Тому дослідження в даному напрямку з наукової точки зору є **актуальними**.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконувалась у НТУУ «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України за темою «Математична модель та система керування машин лиття під тиском», Державний реєстраційний номер 0112U002173.

**Метою** даної роботи є підвищення ефективності процесу лиття під тиском та якості виливків шляхом створення та реалізації моделі та системи керування основними параметрами процесу.

У відповідності з метою вирішувалися наступні **задачі**:

- проведення порівняльного аналізу існуючих математичних моделей керування процесом у замкнутому режимі;
- дослідження окремого та комплексного впливу параметрів процесу на якість виливка та визначення шляхів їх регулювання;
- аналіз, розробка і вдосконалення прямих і непрямих методів контролю параметрів технологічного процесу лиття під тиском;
- наукове обґрунтування, дослідження, розробка і реалізація математичної моделі керування процесом, алгоритмів, засобів контролю і регулювання, що підвищують якість і вихід придатного;
- розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом машини лиття під тиском.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес лиття під тиском.

**Предмет дослідження** – математична модель і система керування технологічним процесом лиття під тиском.

**Методи досліджень.** Дослідження проводились на машині лиття під тиском А711А07(А711А08), так як цей агрегат найбільш пристосований для функціонування в складі автоматичної системи керування, досить простий та надійний в експлуатації. При побудові математичної моделі керування застосовувалися основні положення теорії металургійних процесів і практики ливарного виробництва, теорії автоматичного керування і теорії розпізнавання образів, основи математичного і фізичного моделювання. Алгоритм контролю і керування розроблявся з використанням теорії ймовірності і математичної

статистики. Для контролю параметрів використовувались стандартні методи досліджень і контролю якості. Обробка результатів здійснювалась на ПЕОМ.

Достовірність теоретичних концепцій підтверджена результатами експериментальних досліджень на ПАТ НВП «СЕМЗ», доцільність впровадження розробок підтверджена на ПрАТ «Вишнівський ливарний завод», положення дисертації включено до навчального процесу Інженерно-фізичного факультету, НТУУ «КПІ».

**Наукова новизна** роботи полягає в отриманні нових науково-обґрунтованих результатів для вирішення актуальної задачі, що полягає у розробці математичної моделі й засобів керування технологічним процесом лиття під тиском:

- удосконалено критерій керування технологічним процесом лиття під тиском з мінімізацією повернених виливків і відповідно зниження вартості самого виливка шляхом здійснення керуючих впливів на основні параметри процесу, з визначенням величини цих впливів за кожним попереднім тактом роботи машини лиття під тиском;

- на основі розробленого критерію керування оптимізовано вибір основних параметрів системи контролю технологічного процесу на базі стандартних вимірювальних пристроїв, що дозволило підвищити точність керування, швидкість реакції, і в підсумку вихід придатного;

- розроблено математичну модель замкненого циклу виготовлення виливка при литті під тиском з використанням сучасних методів математичного моделювання, що відрізняються сукупністю контурів регулювання та їх поєднання в цілісну систему, а саме: контурів контролю та регулювання температурою металу та прес-форми, дозування та коректування величини порції металу, регулювання швидкості прес-поршня, запирання та розмикання прес-форми, вилучення виливка та контролю його якості в автоматичному режимі;

- покращено регулювання основних параметрів процесу шляхом підвищення точності контролю, зменшення часу реакції, що дозволило об'єднати контури регулювання температури металу та прес-форми, швидкості

пресування, зусилля запирання, тиску пресування, навколо машинними операціями в єдину замкнуту систему на всіх стадіях технологічного циклу від підготовки шихтових матеріалів до вилучення готового виливка та контролю його якості;

- знайшла подальший розвиток модель температурного поля прес-форми при ритмічній роботі машини ЛПТ, яка відрізняється врахуванням того, що в процесі акумуляції – деакумуляції теплоти приймає участь тільки частина товщини прес-форми – активний шар;

- удосконалено математичну модель теплової обробки шихти в ванні ІТП шляхом розгляду вимушених коливань ванни під дією електричного струму з врахуванням динаміки процесу розплавлення твердої частини в залежності від насипної щільності шихти. Модель може бути використана в інших теплових технологічних процесах, в яких шихта складається із твердої і рідкої частини.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблена система дозволяє використання її як для однієї машини так і для комплексу машин лиття під тиском на підприємствах важкої промисловості України та близького зарубіжжя для оптимізації виробництва та збільшення виходу придатного; дозволяє підвищувати якість та зручність контролю процесу в цілому та вносити доцільні корективи в значення параметрів процесу безпосередньо та в режимі реального часу; АСКТП складається з двох систем: інформаційної та замкненої, що підвищує її універсальність та розширює можливості застосування; критерій оптимізації, на якому засновується модель та система керування покращений та обмежений за вхідними параметрами що підвищує точність керування і як наслідок кінцеву якість продукції. Розроблена модель та система керування рекомендована для встановлення як при створенні нових ливарних комплексів так і для переоснащення існуючих підприємств та цехів лиття під тиском.

Результати наукових досліджень передані для використання на НВП Смілянський електромеханічний завод з метою покращення техніко-економічних показників виробництва складових частин електродвигунів методом лиття під тиском, деякі положення дисертації включені до учбових програм Інженерно-фізичного факультету. Доцільність впровадження розробок



підтверджено на ПрАТ «Вишнівський ливарний завод».

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, написаних у співавторстві, особисто дисертанту належать такі положення: розробка методів і засобів безперервного контролю технологічних параметрів в роботі машини для лиття під високим тиском [2, 24, 26, 28, 29]; розробка і дослідження нового підходу до проблеми розробки математичної моделі керування процесом лиття під тиском [30, 32, 45]; критерій керування технологічним режимом ЛПТ [47, 48, 50]; створення моделі керування, що охоплює найважливіші чинники в отриманні якісного виливка на основі теоретичного обґрунтування і розробки методів отримання достовірної й надійної інформації про хід процесу і реалізації згаданого в АСКТП [27, 29, 50]; розробка системи керування машиною лиття під тиском, що складається з інформаційної підсистеми та підсистеми замкненого керування циклом [48, 50].

**Апробація** основних розділів дисертаційної роботи проводилася при обговоренні доповідей автора на наступних науково-технічних, практичних конференціях і семінарах:

Міжнародна конференція-виставка –Литвол 2012, 2013, 2014 рр., м.

Запоріжжя; Всеукраїнська конференція –Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра 2010 – 2014 рр., м. Київ; Міжнародна конференція –Автоматика-2012, м. Київ; – 2012р. Міжнародна конференція –Нові матеріали та обладнання для роботи в екстремальних умовах, 2012, 2013 рр. м. Київ; Міжнародна конференція –Нові ливарні матеріали та технології, 2012-2014рр., м. Київ; Міжнародна конференція –Матеріали та технології в обробці металів тиском 2012, м. Краматорськ; Міжнародна конференція –Інформаційні технології в освіті, науці та техніці 2012, м. Черкаси.

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені у 23 роботах, з них 5 статей у фахових видавництвах, 1 стаття у закордонному виданні, 16 матеріалів і тез доповідей на науково-технічних конференціях, 1 патент на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 109 найменувань. Об'єм складає 170 стор., з них 154 основного тексту, 11 таблиць, 47 рисунків.

## РОЗДІЛ 1. МАШИНА ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

### 1.1. Загальний опис процесу ЛПТ

При литті під тиском металічний сплав в рідкому або напівтвердому стані подається в камеру пресування спеціальної машини під тиском, що створюється поршнем, який переміщується в цій камері з високою швидкістю. Через ливникові канали сплав заповнює порожнину прес-форми і кристалізується в ній під тиском. При розкритті прес-форми виливок витягується.

Всі сучасні машини для лиття під тиском за принципом роботи вузла пресування поділяють на два класи: машини з гарячою камерою пресування і машини з холодною камерою пресування. У свою чергу, машини з гарячою камерою діляться за способом запресовування металу в форму на поршневі й компресорні [1].

Поршневі машини можуть мати вертикальну або горизонтальну камеру пресування. Поршневі машини з вертикальною камерою пресування підрозділяють на машини з вертикальною (рис. 1.1, а), похилою (рис. 1.1, б) і горизонтальною (рис. 1.1, в) площиною роз'єму прес-форми. Машини з нерухомим горизонтальним металопроводом можуть мати вертикальний (рис. 1.1, г) або горизонтальний (рис. 1.1, д) роз'єм форми. У сучасній практиці поршневі машини з гарячою камерою пресування і горизонтальною площиною роз'єму прес-форми застосовують вкрай рідко.

Машини, в яких рух металу здійснюється під дією стисненого повітря, називають компресорними. Перші конструкції цих машин, розроблені в кінці минулого століття, були призначені для виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів. Принцип їх роботи полягає в тому, що стиснене повітря тисне на всю поверхню металу в тиглі, з якого він надходить по нерухомому металопроводу в прес-форму з вертикальною (рис. 1.1, е) або горизонтальною (рис. 1.1, ж) площиною роз'єму. В даний час компресорні машини такого типу виділилися в окрему групу машин для лиття під низьким тиском [2].

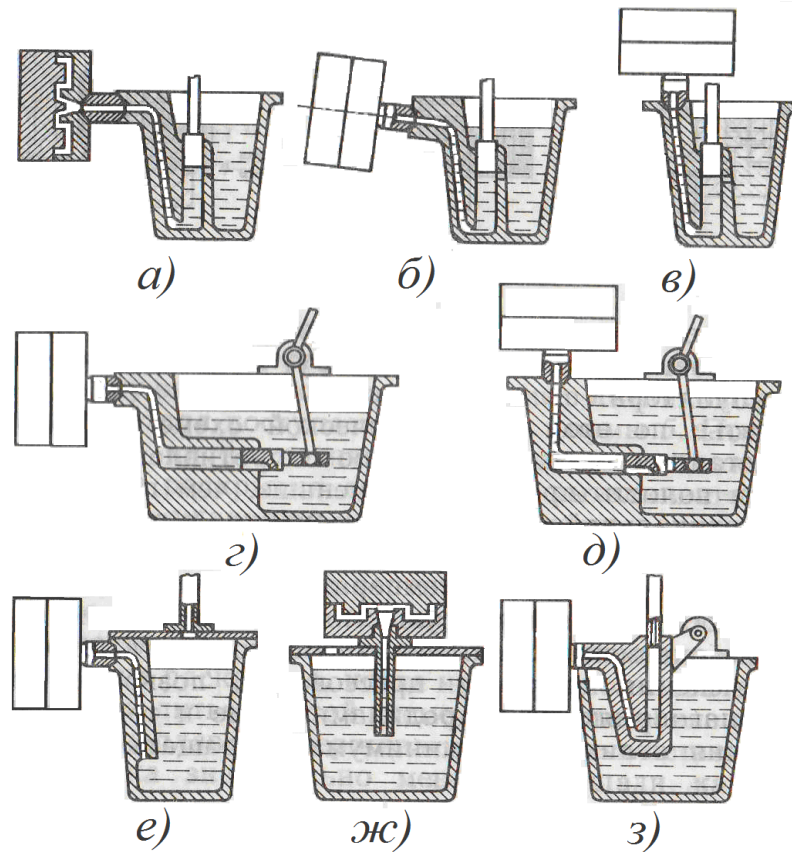


Рис. 1.1. Схеми поршневих і компресорних машин

Компресорні машини для лиття під тиском з нерухомим металопроводом були замінені машинами з рухомим металопроводом, що називається гузнек (рис. 1.1, з). На відміну від машин з нерухомим металопроводом, в яких тиск стисненого повітря на метал не перевищував 60 Па, в машинах з рухомим металопроводом повітря тисне на невелику поверхню металу, що знаходиться в гузнеку, що дає можливість підвищити тиск до 400 Па. Крім того, в гузнеку різко зменшується поверхня окислення рідкого металу.

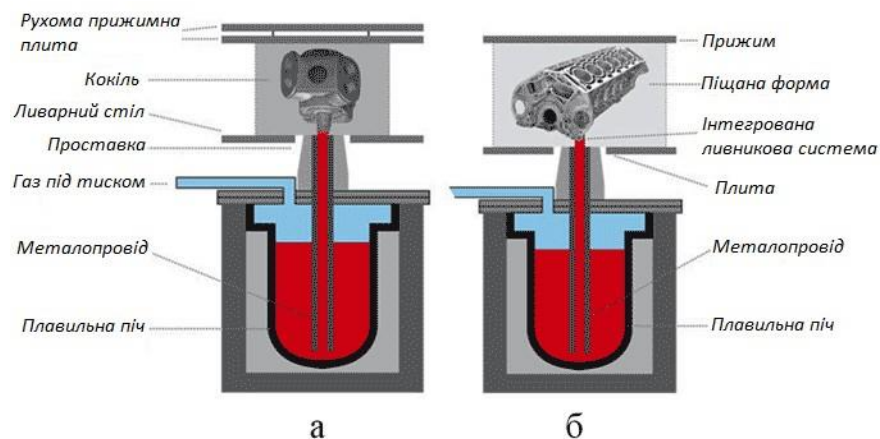


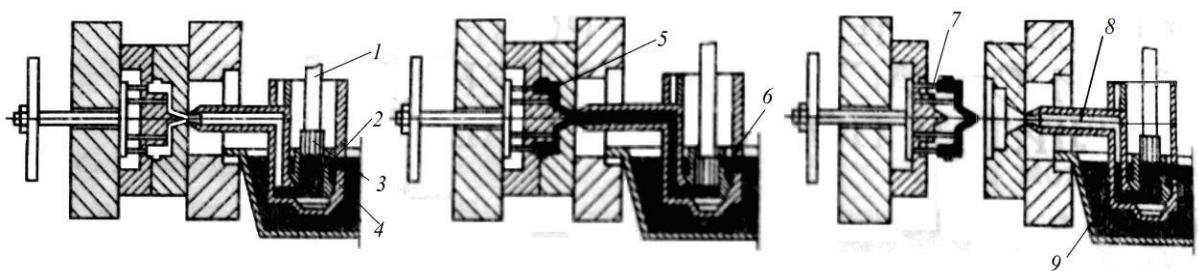
Рис. 1.2. Принципова схема лиття під низьким тиском (а – в кокіль, б – в піщану форму)

Машини з гузнеком не могли забезпечувати високу якість виливків зі сплавів на основі алюмінію і швидко виходили з ладу через роз'їдання сталевих рухомих деталей камери пресування. Їх застосовували головним чином для отримання виливків з цинкових сплавів.

Принцип роботи перших машин литва під тиском зберігся в одному з класів сучасних машин, які отримали назву машин з гарячою камерою пресування. Але тільки винайдення машин з холодною камерою пресування дозволило отримати виливки з алюмінієвих сплавів необхідної якості [3].

Існують чотири основні схеми процесу лиття під тиском, що дозволяють отримувати широку номенклатуру виливків з різноманітних сплавів.

Перша схема – лиття під тиском з гарячою камерою пресування (рис. 1.3). Камера пресування, яка знаходиться безпосередньо в тиглі 4 з розплавленим металом, заповнюється металом через заливний отвір 3. Розплавлений метал під дією поршня 1, що приводиться в рух пневматичним або гідравлічним циліндром, витісняється з камери пресування 2 в порожнину прес-форми 5 при перекритому отворі 6. Метал кристалізується, утворюючи виливок 7, а прес-поршень повертається в вихідне положення. Залишок рідкого металу зливається по каналу 8 і металопроводу 9 в камеру пресування. Після охолодження до заданої температури виливок видаляється з робочої порожнини форми. Прес-форма очищається, змазується, і робочий цикл повторюється.



*Рис. 1.3. Схема лиття під тиском на машинах з гарячою камерою пресування*

Технологічними перевагами цієї схеми є стабільність технологічних параметрів, відсутність втрат сплаву в процесі заливання, широкі можливості автоматизації всього ливарного циклу, висока продуктивність. Істотні недоліки

– швидке зношування пресувальної пари (поршня і камери пресування), утворення зазору між ними, що призводить до зниження тиску пресування. Це викликає підвищену пористість, зниження якості поверхні, чіткості оформлення конфігурації виливка.

Литтям під тиском на машинах з гарячою камерою пресування можна отримувати виливки зі сплавів, які не реагують з матеріалом пресувальної пари і металопроводу.

Друга схема – лиття на машинах з холодною вертикальною камерою пресування (рис. 1.4). Розплавлений метал заливається в камеру пресування 1 з рухомим дном 2, що називається п'яткою. Прес-поршень 3 в момент заповнення камери знаходиться в верхньому положенні, потім він опускається на метал, переміщуючи п'ятку вниз і відкриваючи отвір в ливниковій втулці 4, через який метал надходить в порожнину форми 5. Після тверднення металу п'ятка підіймається і відокремлює ливник від прес-залишку 6. Після розкриття прес-форми виштовхувачами з її рухомої частини видаляється виливок разом з ливниковою системою.

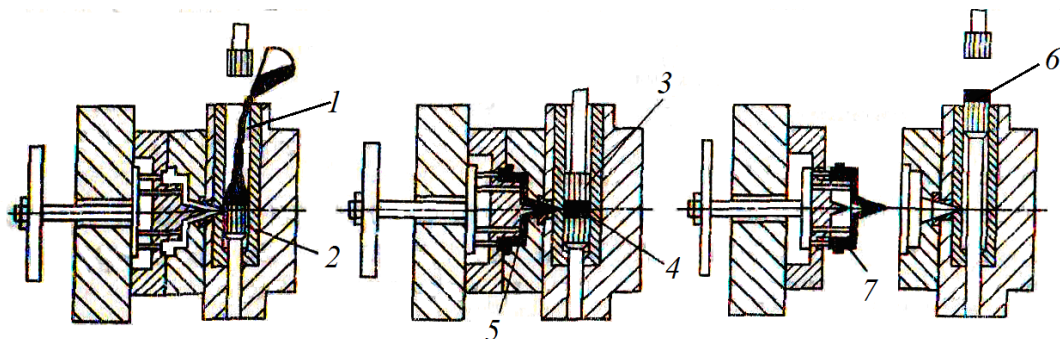
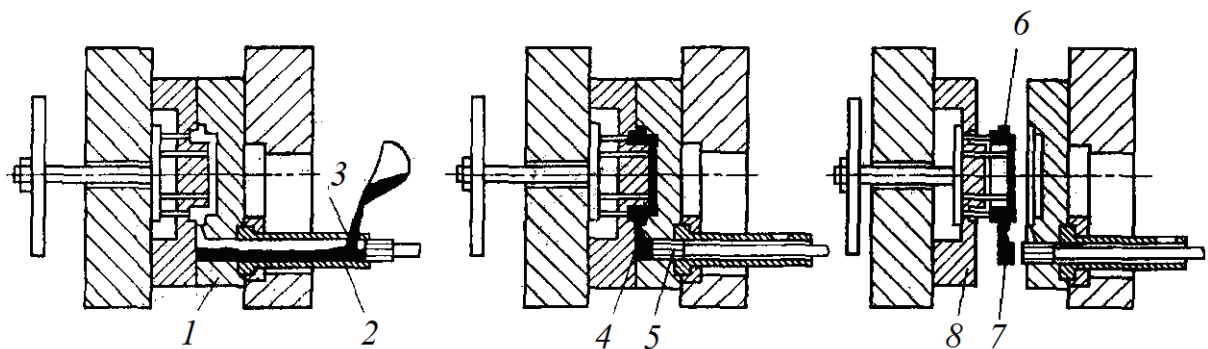


Рис. 1.4. Схема лиття під тиском на машинах з холодною вертикальною камерою пресування.

Технологічну схему з вертикальною камерою пресування доцільно використовувати в тих випадках, коли виливки мають глибокі порожнини при відносно невеликому ході рухомої плити машини на розкриття, коли потрібно використовувати центровий ливник. При литті за цією схемою неметалічні вклучення, що знаходяться в розплаві, затримуються в прес-залишку, так як площа ливника значно менше площі камери пресування.

Третя схема – лиття на машинах з холодною горизонтальною камерою пресування (рис. 1.5). Розплавлений метал заливається в камеру пресування 2, розташовану горизонтально відносно осі машини і перпендикулярно до площини роз'єму форми, безпосередньо зв'язану з нерухомою половиною форми 1. У верхній частині камери є вікно 3 для заливання металу. При русі прес-поршня 5 метал через живильник 4 заповнює робочу порожнину форми. Після закінчення кристалізації металу форма розкривається, і виливок 6 з прес-залишком 7 виштовхується прес-поршнем з нерухомої частини форми 8. Як правило, виливок залишається в рухомій половині прес-форми, а потім виштовхується з допомогою системи штовхачів, або скидається в спеціальну тару, або витягується захватами маніпулятора.

При литті за цією технологічною схемою втрати теплоти рідким металом і гідравлічний опір на шляху його руху в порожнину прес-форми менше, ніж при литті на машинах з вертикальною камерою пресування в результаті виключення одного з елементів ливникової системи – ливникового ходу. Це дозволяє знизити температуру заливання сплаву, зменшити пористість виливків і здійснити ефективне підпресування після закінчення заповнення форми. Можливість широкого діапазону зміни швидкості пресування дозволяє створювати найбільш сприятливі гідродинамічні й теплові умови формування виливків, до мінімуму скорочувати пористість виливків.



*Рис. 1.5. Схема лиття під тиском на машинах з холодною горизонтальною камерою пресування.*

В останні роки технологія отримання виливків на машинах з холодною горизонтальною камерою пресування отримала найбільше поширення як у нас

в країні, так і за кордоном.

При литті під тиском основними факторами, що визначають формування виливка, є тиск в камері пресування і прес-формі, швидкості руху поршня і впуску рідкого металу в форму, параметри ливниково-вентиляційної системи, температури заливання металу і форми, режими змащування і охолодження робочої порожнини форми і камери пресування.

Сукупність таких параметрів, як тиск в потоці металу, швидкість руху металу, протитиск, що виникає внаслідок утрудненого видалення повітря і газоподібних продуктів згоряння змащувального матеріалу, визначає гідродинамічний режим формування виливка. Температури сплаву і форми, тривалість заповнення та підпресовки, а також темп роботи визначають тепловий режим процесу.

Від правильного вибору технологічних режимів заповнення та підпресування, що визначають конструкцію прес-форми, тип і потужність машини для лиття під тиском, залежить якість виливків. Гідродинамічний режим формування виливка формує кінетику заповнення, газовий режим форми, характер розподілу газових включень в виливку і якість рельєфу його поверхні. Тиск в потоці металу виникає в результаті опору руху металу при проходженні його через тонкі перерізи порожнини прес-форми й обтіканні стрижнів, при поворотах, звуженнях і розширеннях потоку. У разі відсутності опору величина гідродинамічного тиску в потоці визначається протитиском повітря і газів, видалення яких утруднено через неможливість виконання вентиляційних каналів великого перерізу [3, 4].

Чіткість оформлення рельєфу і шорсткість поверхні виливка залежать від кінетичної енергії потоку. У момент закінчення його руху створюється гідродинамічний тиск на стінки прес-форми

$$p_n = \rho_m \cdot v_\phi^2 \quad (1.1)$$

де  $\rho_m$  – густина рідкого металу,  $\text{кг/м}^3$ ;

$v_\phi$  – швидкість потоку в прес-формі.

Висока швидкість впускного потоку (швидкість впуску) відповідає



отриманню тонкостінних крупно габаритних виливків складних обрисів.

Високі швидкості впуску і потоку в прес-формі створюються в результаті швидкого переміщення пресувального поршня. Для подолання опору маси металу, що кристалізується в тонких перетинах формуючої порожнини, а також опору газів, які залишаються в виливку, необхідний високий гідростатичний тиск. Він передається від пресувального поршня через ливниковий канал. Процес передачі гідростатичного тиску в порожнину прес-форми називається підпресуванням. Використання потовщених живильників дозволяє здійснити підпресування та живлення виливка рідким металом в період кристалізації і тим самим усунути усадочні раковини.

Процес руху металу в камері пресування і прес-формі можна розбити на чотири фази. На рис. 1.6 наведені криві зміни швидкості  $v_{пр}$  переміщення пресувального поршня і тиску  $p$  робочої рідини в циліндрі пресування за час ходу поршня.

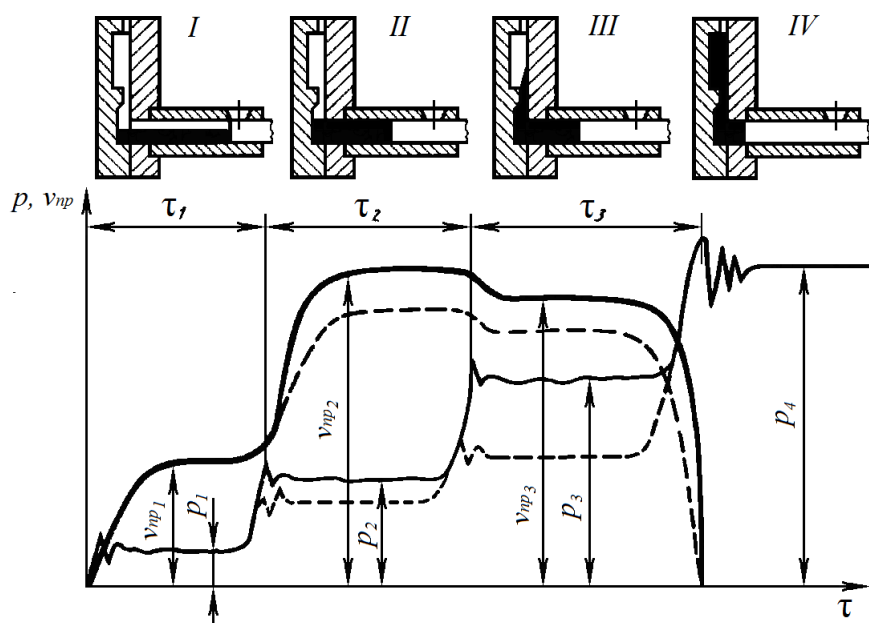


Рис. 1.6. Зміна швидкості пресувального поршня і тиск в камері пресування за час ходу поршня

Якщо прес-форма заповнюється суцільним потоком, то зміна тиску металу в її порожнині буде подібна зміні тиску рідини в циліндрі. За час  $\tau_1$  поршень перекриває заливальний отвір (фаза I). Швидкість поршня  $v_{пр1}$  невелика. Значення  $p_1$  відповідає тиску, необхідному для подолання тертя в гідравлічному циліндрі і камері пресування. Період  $\tau_2$  (фаза II) відповідає



заповненню металом під дією поршня всього об'єму камери пресування до ливникових каналів. Швидкість поршня починає зростати і досягає максимального значення  $v_{пр2}$ . Тиск  $p_2$  більше  $p_1$  на величину гідравлічних опорів в камері пресування [3].

У період часу  $\tau_3$  (фаза *III*) заповнюється ливникова система і порожнина прес-форми. Внаслідок різкого звуження потоку в живильнику швидкість падає до  $v_{пр3}$ , а тиск  $p_3$  підвищується. При менших значеннях максимальної швидкості тиск в фазах *II* і *III* також падає (штрихові лінії). В момент закінчення ходу поршня відбувається гідравлічний удар внаслідок ітераційних сил рухомих частин пресувального механізму, тиск зростає. Після затухання коливань встановлюється кінцевий гідростатичний тиск  $p_4$  і через дуже короткий проміжок часу починається фаза *IV* – підпресування. Допустимі величини тривалості спрацювання підпресувального механізму  $\tau_{сп}$  в залежності від значущого розміру живильника і вилівка  $\delta$  наведено в табл. 1. Величина кінцевого тиску залежить від роду сплаву, його стану (в'язкості, густини) вимог до вилівка та інших факторів. Вона може змінюватись від 50 до 500 МПа. Якщо до моменту досягнення тиску  $p_4$  метал в живильнику залишається рідким або, як правильно називати рідкоплиним, то цей тиск передається на затверділий виливок. Максимальне зусилля підпресування має розвиватися пресувальним механізмом машини не в момент початку кристалізації вилівка, а практично відразу по закінченні заповнення прес-форми [4].

*Таблиця 1.1 Технологічно припустимі тривалості спрацювання механізму підпресовки.*

$\delta_{вил}$	$\delta_{жив}$	$\tau_{сп}$ , с, для сплавів			
мм		цинкові	алюмінієві	магнієві	мідні
2	1	0	0,042	0	0
	1,5	0,048	0,194	0,021	0,056
4	1	0	0	0	0
	2	0	0,168	0	0
	3	0,191	0,770	0,044	0,108
6	2	0	0	0	0
	4	0,193	1,230	0	0,266
8	2,5	0	0	0	0
	6	0,764	2,405	0,102	0

Тепловий режим процесу забезпечує рухливість сплаву як в період заповнення форми, так і в процесі підпресування. Він пов'язаний з високою інтенсивністю теплової взаємодії рідкого металу зі стінками прес-форми.

Процес охолодження можна умовно розділити на два періоди. Перший – охолодження рідкого металу при русі його в ливниковій системі й порожнині, що оформлює виливок. На цьому етапі необхідно правильно вибрати тривалість заповнення, щоб попередити утворення недоливів, поруватості та окисних плівок. Другий період – кристалізація металу після заповнення прес-форми. На цьому етапі необхідно створити умови направленої кристалізації металу виливка. Дотримання принципів направленої кристалізації багато в чому залежать від технологічності конструкції виливка, температури сплаву, що заливається і температури прес-форми. Тепловий режим визначає не тільки якість виливків, але і стійкість форми. Термін експлуатації прес-форми залежить від величини максимальних температурних напружень і коефіцієнта лінійного температурного розширення матеріалу прес-форми, а також знижується через активну силову взаємодію між сплавом та нагрітими частинами форми [4, 6].

Терморегулювання робочої порожнини прес-форми шляхом охолодження водою необхідно для стабілізації й вирівнювання теплових умов в різних за товщиною перерізах виливка. Для забезпечення зварювання окремих потоків металу для попередження незливів, поруватості й окисних плівок тривалість заповнення не повинна перевищувати частки секунди. При розробці теплового режиму велике значення має розрахунок тривалості заповнення форми. Виливки складної конфігурації заповнюються послідовно дисперсно-турбулентним потоком. В цьому випадку тривалість заповнення  $\tau_{\text{зап}}$  визначається при умові, що дисперсний характер руху відповідає першому періоду заповнення, а турбулентний – другому. По тривалості заповнення, що визначається на основі розгляду теплових умов в формі, підраховують технологічну швидкість пресування

$$v_{\text{пр}} = m_{\text{вил}} / (\rho_i \cdot F_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{пр}}) \quad (1.2)$$

де  $m_{\text{вил}}$  – маса виливка, кг;

$F_{\text{пр}}$  – площа поперечного перерізу камери пресування, м<sup>2</sup>;

$\rho_i$  – густина сплаву, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau_{\text{пр}}$  – час пресування, с.

При створенні сприятливих теплових умов, що забезпечують збереження рідкотекучості металу в ливникових каналах і порожнині форми, особливо в найтонших перерізах, можливо здійснити підпресовку. Підпресовка в процесі кристалізації сплаву стискає газові включення, зменшує усадкову поруватість і покращує структуру металу. Чим менше час досягнення максимального тиску підпресовки, тим вище її ефект (на сучасних машинах до 0,01 с). На основі розрахунку гідродинамічного та теплового режимів процесу визначають параметри пресувального механізму машини лиття під тиском [7, 8].

Зміна якості виливків пов'язана з коливанням параметрів технологічного процесу. Нестабільність параметрів призводить до браку. Аналіз процесу ЛПТ показує, що брак виливків з'являється, в основному, по двох причинах: не оптимізовані режими лиття, або вони порушуються в процесі виробництва [1].

Якщо режими лиття не оптимізовані, тобто не знайдені такі параметри технологічного процесу, при яких якість виливків задовольняє вимогам, що пред'являються до них, то необхідно провести дослідження по оптимізації.

Якщо ж оптимальні режими відомі, а брак у виливках виникає через порушення режимів лиття, то це може відбуватися з вини ливарника або унаслідок збою устаткування. Ливарник, що працює на машині ЛПТ, не може протягом всієї зміни виконувати операції з виготовлення виливків в одному і тому ж темпі й підтримувати на заданому рівні технологічні параметри. Для стабілізації змінних параметрів, що залежать від роботи устаткування в умовах випадкових збурень, необхідно автоматизувати процес.

Вирішення поставлених завдань дозволяє істотно знизити кількість браку виливків. Проте при роботі устаткування в автоматичному режимі за жорсткою програмою можливі зовнішні збурення (поповнення розплавом роздаточної печі, підлив розплаву в зазор між пресс-поршнем і стаканом й ін.), що

порушують оптимальні режими лиття і призводять до браку. Для нормального ходу технологічного процесу необхідні контроль якості виливків і коректування режимів лиття. Ці функції зазвичай виконує оператор, що обслуговує АСК і фактично підтримує зворотний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами технологічного процесу [2, 3].

Щоб автоматизувати операції контролю якості виливків і коректування режимів лиття, необхідно розробити засоби контролю показників якості продукції, створити математичну модель, що пов'язує показники якості зі змінними параметрами технологічного процесу, розробити і реалізувати алгоритм управління процесом на керуючому обчислювальному комплексі [9].

Складність адекватного описання технології полягає в різноманітності параметрів і випадкових збурень, що виникають при виготовленні виливків. Для описання процесу ЛПТ можуть бути використані детерміновані і стохастичні математичні моделі. Детермінована модель відповідає певним зв'язкам вхідних і вихідних параметрів процесу. Стохастичні моделі використовують неповну визначеність зв'язків змінних параметрів і показників якості виливків, які оцінюються статистично [1,9]. Детерміновані моделі звичайно використовують для якісного вивчення процесу ЛПТ. Для управління технологічним процесом їх не застосовують через недостатню адекватність описання цього процесу.

Стохастичні математичні моделі враховують складні зв'язки змінних параметрів і показників якості виливків. Їх отримують зазвичай при обробці статистичних даних методами кореляційного и регресійного аналізів. Ці моделі мають частковий характер і можуть бути використані тільки для оптимізації режимів ЛПТ, про які накопичено статистичні дані. Проведений аналіз автоматизованих ливарних комплексів, що працюють, показує, що основною тенденцією їх розвитку є оснащення обладнання інформаційними системами контролю з наступним переходом до замкнутих систем управління [10].

## 1.2. Параметри, що контролюються, та існуючі методи їх контролю.

В технологічному процесі ЛПТ на якість готового виливка впливають безліч технологічних параметрів, які безперервно варіюються не тільки в процесі в цілому, але й в кожному окремо взятому циклі. Для досягнення високої якості готових виливків необхідний ретельний контроль та регулювання якомога більшого числа параметрів процесу, таких як: натягнення колон, тобто сили змикання півформ, тиску пресування й підпресовки, температурних параметрів як частин безпосередньо машини (температура півформ), але також і температури в роздаточній печі, рідкого металу, що надходить до камери пресування, дозування розплаву та інших. Принцип побудови моделі керування розглянемо на температурному полі ванни плавильної печі.

### 1.2.1. Методи контролю температури металу

Температура металу, що поступає в камеру пресування машини лиття під тиском (ЛПТ) є важливим параметром технологічного процесу. Він впливає на всі технологічні операції: режим змащування прес-форми, тепловий, запресовку, підпресовку, час витримки готової відливки в прес-формі. Уважно слідкувати за температурним режимом плавки змушує і те, що навіть незначне підвищення температури (на 20...40 °С) в порівнянні з допустимою для даного матеріалу тигля різко зменшує термін служби останнього.

Відома ціла низка різноманітних методів контролю температури печі. Разові заміри температури в агрегаті термопарами занурення є домінуючим методом контролю температури. Але такі методи мають відносно високу вартість в умовах нагріву металу в тигельних агрегатах. Крім того постійне довантаження печі твердим холодним металом заважає проводити прямі заміри температури, та робить їх недостатньо інформативними, тому що частина металу знаходиться в твердому стані [11].

### 1.2.2. Спосіб контролю зусилля запирання за натягненням колон

Натяг колон машини ЛПТ — один із основних параметрів процесу, який забезпечує стабільні умови роботи прес-форми та машини лиття. За натягом визначаються технологічні можливості машини.

Використання приборів для контролю натягу колон дозволяє:

- зменшити облой в площині роз'єму прес-форми, що підвищує точність виливків, зменшує трудоемність зачисних робіт;
- підвищити густину та чистоту поверхні виливка шляхом використання більш високих значень швидкості та тиску пресування;
- збільшити термін служби прес-форми і машини ЛПТ шляхом усунення перекосів і перенапружень окремих елементів механізму запирання.

Найпоширенішим способом визначення величини зусилля, що отримує направляюча колона, являється метод, який лежить в основі вимірювання видовження колони при закритті прес-форми. Зусилля  $P$ , що отримує колона, визначається за відомою формулою:

$$P = \Delta l E \Omega / l \quad (1.3)$$

де  $\Delta l$  — деформація базової частини колони  $l$  при запиранні форми;

$E$  — модуль пружності Юнга матеріалу колони;  $\Omega$  — площа поперечного перетину колони.

Для виміру та автоматичного регулювання натягу колон використовуються механічні, індуктивні та тензометричні датчики деформації, які установлюються на кожній з чотирьох колон. Останнім часом найпоширенішими стали тензометричні датчики, які переводять параметр вимірювання (силу, вагу, тиск, натяг, деформацію) в уніфікований електричний сигнал для передачі та використання в АСКТП.

Найчастіше використовуються призначені для вимірювання статистичних сил стискання тензорезисторні силовимірювальні датчики безклеєві ДСП ДСТБ-С-060, що були розроблені в НВО «Київський інститут автоматики» та клеєві 1778 ДСТ...К, розроблені в НИКИМП (м. Москва).

Принцип дії датчиків лежить в основі тензоефекту провідника – зміні його електричного опору при деформації.

Чутливий елемент датчика ДСП ДСТБ-С-060, розміщений в герметичному корпусі, – кругла пластина з жорстким центром, що опирається по контуру, її деформація пропорційна прикладеному зусиллю. Електричний міст (рис. 1.7), який складається з дріт'яних тензорезисторів розтягу R1 та R2, тензорезисторів стискання R3 та R4, що намотані відповідно на верхні та нижні стійки пластини чутливого елемента, підключений до джерела опорної напруги живлення (на схемі не показано). Зусилля, що вимірюється діє на пластичний елемент датчика і створює у місцях розміщення тензорезисторів деформацію, яка перетворюється ними в електричний сигнал, пропорційний зусиллю, що вимірюється.

Резистори R5...R12 служать для настройки датчика температурної компенсації та підгонки електричних параметрів до номінальних значень. Під дією зусилля деформація пластини викликає зміну опору тензорезисторів, що призводить до розбалансування моста та появі сигналу виходу, пропорційного зусиллю, що вимірюється. Вихідний сигнал моста передається на вимірювальний пристрій.

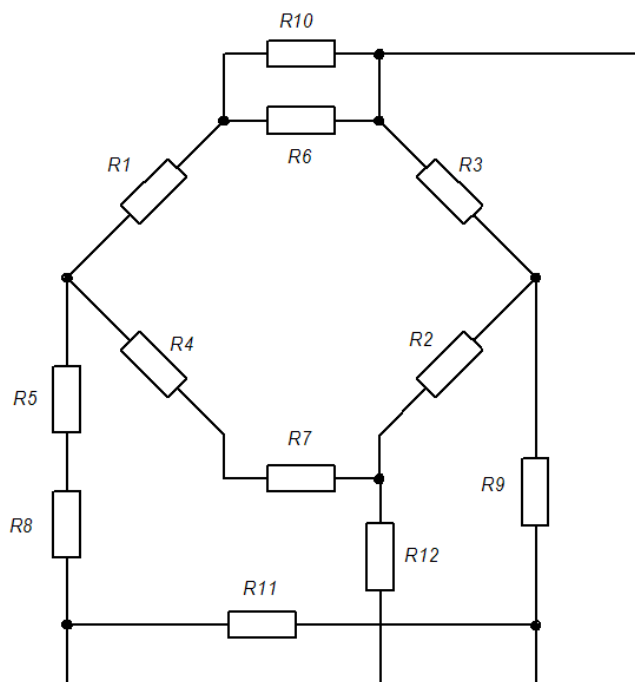


Рис. 1.7. Електрична схема силовимірювального тензорезисторного датчика ДСП ДСТБ-С-060

Датчик призначений для виступаючого монтажу. Опорний елемент — основа корпусу. При монтажі необхідно забезпечити співвісність всіх елементів, що передають зусилля на датчик, а в процесі використання датчик має бути захищений від поперечних зміщень об'єкта сило-вимірювання.

Пружний елемент датчика 1778 ДСТ ... К, який отримує силу, представляє собою хрестовину із чотирьох і більше балочок з жорстким центром. По краях балочки шарнірно прикріплені до жорсткої кільцеподібної основи корпусу. У випадку прикладення навантаження балочки прогинаються, викликаючи деформацію приклеєних на них тензорезисторів, з яких чотири сприймають деформацію стискання, а інші чотири — розтяг. Пружні шарніри розвантажують місця приклеювання тензорезисторів від натягу, покращуючи тим самим лінійність датчика і підвищуючи його чутливість.

В складі АСКТП описані датчики зусилля використовуються в комплекті з перетворювачем електронно-тензометричним (ПЕТМ), який було розроблено в НВО «Київський інститут автоматики». Функції які виконує перетворювач: вимірювання значень параметрів, перетворення вихідних аналогів сигналів в уніфікований сигнал постійного струму 0...5 мА для введення в засоби обчислювальної техніки, додавання значень параметрів. ПЕТМ формує позиційний сигнал наявності технологічного параметру (нормально-відкритий контакт), забезпечує гальванічне розділення: вхідного та вихідного ланцюга; вхідного та вихідного ланцюга і ланцюга живлення; ланцюга живлення та корпусу.

Конструкція перетворювача виконана на базі уніфікованих типів конструктивів. В елементній базі використані елементи агрегованих комплексів АСЕТ, АСК, КС2 й ін. Такі датчики та загалом спосіб контролю сили змикання прес-форми через натягнення колон дають гарні результати та досить докладно описують даний параметр процесу [12].

### 1.2.3. Методи контролю операцій пресування та підпресування

Контроль операції пресування і підпресування в машині ЛПТ здійснюється за швидкістю пресування та тиску робочої рідини в циліндрі.



Швидкість пресування — один з головних параметрів, що характеризує технологічний режим ЛПТ. За відомою величиною швидкості пресування на основі напівемпіричних залежностей можна визначити такі параметри процесу, як час заповнення порожнини форми та швидкості запуску металу в форму.

На практиці дуже часто швидкість пресування встановлюється за числом обертів вентиля швидкості (для зручності відліку використовуються лічильники та індикатори). Цифрове значення швидкості пресування визначають за графіками залежності її від числа обертів запірного вентиля. Як правило, такі графіки будують по даним вимірювань швидкості прес-поршня при різних значеннях числа обертів вентиля на холостому ході машини. Проте швидкість пресування залежить також і від інших факторів, які визначають умови використання: в'язкості робочої рідини, зусилля поршня, стану манжета, маси вилівка і т.д. В практиці ЛПД використовуються способи, які дозволяють визначити середню швидкість пресування на заданій ділянці шляху, максимальну швидкість пресування на всьому відрізку шляху, істинну швидкість пресування як функцію часу.

На першому принципі збудована велика номенклатура вимірювачів, спільним для яких є спрацювання контактних (чи безконтактних) датчиків по шляху руху поршня за рахунок упору, закріпленого на штоку. Датчики вмикають секундомір, який вимикається при проходженні упором другого датчика. Середня швидкість пресування,  $w_{cp}$  м/с, в цьому випадку визначається за формулою

$$w_{cp} = l/\tau \quad (1.4)$$

де  $l$  — відстань між датчиками, м;

$\tau$  — показники секундоміру, с.

При вимірюванні середньої швидкості на порівняно малому відрізку шляху (0,02...0,03 м) точність відліку часу, яка може бути досягнута електросекундоміром (соті долі секунди), недостатня. Тому замість секундоміра машини ЛПТ фірми Buhler (Швейцарія) оснащуються генераторами звукової частоти і лічильниками.

При запресуванні металу в форму величина швидкості пресування

спочатку збільшується від нуля до максимуму, а потім падає до нуля. Такимчином по максимальній величині швидкості пресування можна встановити режим пресування.

Прилади для вимірювання максимальної швидкості пресування значно складніші ніж прилади вимірювання середньої швидкості й більш універсальні, так як не потребують строгої прив'язки до конкретної частини шляху поршня, фіксуючи максимальну швидкість протягом всього ходу поршня. Відомо декілька конструкцій таких приладів. В якості датчика, що безперервно подає сигнал про величину швидкості пресування, можна використовувати тахогенератор, індуктивний датчик або потенціометр з диференційним ланцюгом. Посилувач (струму або напруги) та запам'ятовувальний пристрій виконуються за різними схемами. В якості індикаторів зазвичай використовуються мікроамперметри.

Для вимірювання швидкості пресування як функції часу для досліджень процесу ЛПТ застосовуються швидкодіючі реєстратори (електроннопроменеві та світлопроменеві осцилографи). В теперішній час такі осцилографи фірма *Wotan* вбудовує в шафи для приладів машини ЛПТ для контролю технологічного процесу та налаштування машин. В якості датчиків швидкості пресування використовуються індукційні та реохордні датчики. Практика використання індукційних датчиків показала, що вони надійні, прості у виготовленні та використанні, мають лінійний вихід від швидкості руху. До недоліків таких датчиків слід віднести спотворення значень дійсної швидкості на початку та в кінці шляху через появу ЕДС самоіндукції, а також зміну з часом величини індукції постійного магніту.

Для запису кривої переміщення поршня, що пресує, в часі найбільш зручні потенціометричні датчики, які дозволяють безпосередньо або через підсилювач подавати сигнали на шлейфовий осцилограф. Проте під час керування процесом з використанням засобів обчислювальної техніки ці датчики виявляються малоефективними [13].

Для контролю швидкості прес-поршня розроблений щілинний фотоелектричний вимикач (ФЕВ), який складається із корпусу з пазом, в якому

може спокійно рухатися діафрагма переривача світла, що механічно пов'язана з прес-поршнем. В корпусі вимикача розміщений блок із двох нерухомих оптронних пар (світлодіод – фотодіод) і плати електронної схеми для перетворення та підсилення сигналу. ФЕВ зроблений двоканальний і при русі діафрагми з прорізами всередині паза на виходах з'являються послідовності електричних імпульсів, зсунутих по фазі відносно один одного (рис. 1.8). При ввімкненні напруги живлення світлодіоди **VD3** та **VD4** випромінюють потік світла, освічуючи через паз корпусу два фотодіоди **VD1** та **VD2**, кожен з яких підключено до відповідного формувача-підсилювача імпульсів. При переміщенні вздовж паза корпусу діафрагми-переривача з прорізами змінюється світловий потік на фотодіодах, в результаті чого змінюється сила струму, який проходить через фотодіоди та поступає на входи формувачів-підсилювачів, зібраних на мікросхемі **CA3** і транзисторах **V1** для першого і **V2** для другого каналів.

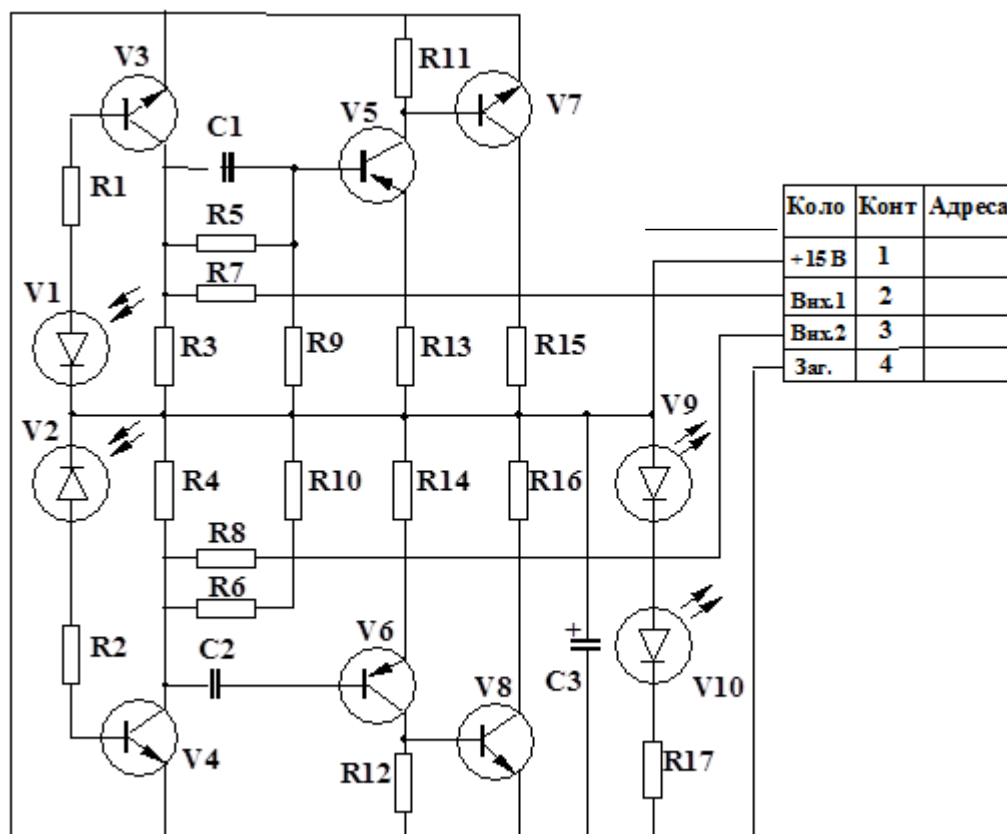


Рис. 1.8. Електрична схема ФЕВ

На виходах формувачів-підсилювачів (резистори **R15** і **R16**) утворюються дві незалежні серії вихідних сигналів (виходи 1 і 2 каналу). Наявність двох

каналів не тільки підвищує роздільну здатність датчиків швидкості, але і дозволяє позбавитися від отримання хибних сигналів при зупинці прес-поршня в момент закінчення пресування (биття діафрагми в цей момент не сприймаються, так як сприймаються лише почергові сигнали, що надходять від двох каналів).

Датчик ФЕВ успішно експлуатується на машинах ЛПД, що випускають Дослідний завод НВО –НІСЛ (м. Одеса), і в Ливарних комплексах Тираспольського ПО –Літмаш, встановлених на Полтавському заводі "Електромотор".

#### 1.2.4. Контроль тиску пресування

Підтримання тиску пресування сприяє стабілізації технологічних параметрів механізму, що пресує. За величиною тиску робочої рідини в циліндрі пресування посередньо визначається тиск металу в камері пресування чи порожнині вилівка і якість її поверхні. Датчики тиску працюють в тяжких експлуатаційних умовах. Окрім вимірювальної величини, на датчики активно впливає температура, вібрація, ударні навантаження, вологість, запиленість і агресивність навколишнього середовища, які змінюються в часі. Контроль тиску робочої рідини в циліндрі пресування відбувається в динамічному режимі. В період підпресовки постійна часу вимірювача тиску не повинна перевищувати  $0,33 \cdot 10^{-3}$  с.

Жоден із відомих вітчизняних датчиків тиску не відповідає вимозі швидкодії. Так, найкращий з серійних датчиків перетворювач –Метран-100 з малим рівнем основної похибки  $\pm 0,5\%$  має недостатню швидкодію для такого інтенсивного процесу як ЛПТ і, крім того, чутливий до дії на нього змінної температури середовища.

В НПК –Київський інститут автоматики» проведено комплекс робіт по створенню тензорезисторного перетворювача тиску типу ПДЛ з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками на основі використання безклеєвих чутливих елементів для контролю надлишкового тиску робочої

рідини в гідроциліндрах пресування машин ЛПТ [6]. Відсутність проміжного шару (клею) здійснює великий вплив на покращення характеристик перетворення параметра, що вимірюється в вихідний електричний сигнал.

Тиск, що сприймається вимірювальною мембраною 2 (рис. 1.9), викликає її деформацію. Деформація пружного елемента через множники деформації безпосередньо передається дровим тензорезисторам, які з'єднані в мостову електричну схему. Корпус 2 забезпечує герметизацію порожнини датчика. Різьбовий штуцер 3 призначений для під'єднання перетворювача до об'єкта.

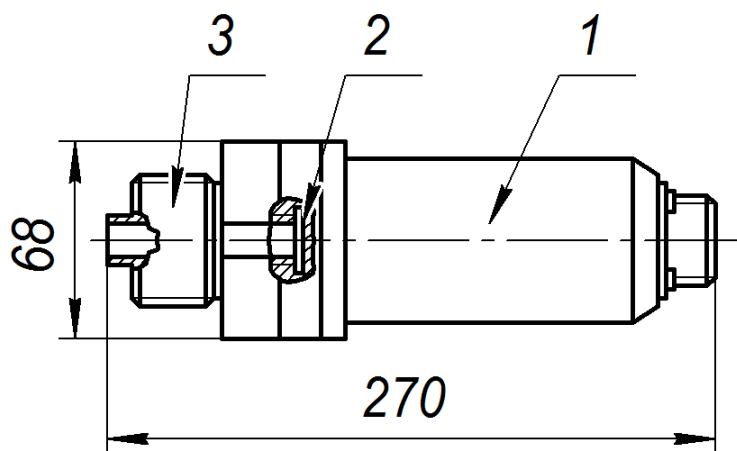


Рис. 1.9. Тензорезисторний датчик тиску ПДЛ.

Можна зробити висновок, що такий параметр процесу як тиск пресування досить складний для опису та вимірювання, а отже для контролю та моделювання в подальшому. Оскільки використання вітчизняних датчиків не задовольняє повністю поставленим вимогам, необхідно провести детальний пошук або проектування більш підходящого датчика для контролю тиску пресування та включення його до комплексу АСКТП [13].

#### 1.2.5. Зміна температурних параметрів

Якість виливків, що виготовляються ЛПТ, визначаються фактором до яких в першу чергу варто віднести температуру сплаву і прес-форми. Сталість температури металу, що заливається в камеру пресування машини є одним з

найважливіших умов підвищення якості продукції. При цьому також важно знати, як підтримується задана температура сплаву в роздаточній печі.

Для візуального контролю та автоматичного регулювання теплового стану технологічних об'єктів автоматизації (прес-форми, плавильної і роздаточної печі) використовуються датчики температури. Використовуються як стаціонарні, так і переносні датчики. Останні виконуються у вигляді контактних термоелектричних термометрів, тому що використання пірометрів випромінювання не доцільно, через екранування об'єктів контролю двоокисом вуглецю і парами води, що виділяється при розкладанні змазочно-охолоджуючої рідини, оксидними плівками розплаву.

ЛПТ в наш час виробляє виливки з кольорових сплавів на основі алюмінію, цинку і магнію, температура яких в тиглі роздаточної печі 380 – 700 °С. Для контролю температури металу в печі використовуються стандартні термоелектричні термометри хромель-копелеві ТХК-529 (до 600 °С) і хромель-алюмелеві ТХА-0515 (до 900 °С), які мають лінійну характеристику практично в усьому діапазоні контролю.

Налаштування технологічного режиму отримання виливків виконуються на основі показників стаціонарних термометрів ТХК-529, що вмонтовані в стінку прес-форми. Цими ж термопарами або термометрами опору ТСП-047К, вимірюється температура рідини, що подається в форми.

При вимірюванні температури агресивних металів та сплавів до яких відноситься алюміній і його сплави виникає необхідність, герметичності термоелектродів. Для підвищення стійкості термопар в якості матеріалу захисної арматури гарячого спаю, використовуються чохла з графіту або азботермосилікату. Варто відзначити, що керамічний чохол не витримує різких перепадів температури, через його низьку теплопровідність.

Термопара зі захисними чохлами зі сталі марок 1Х18Н9Т, Х25Т, 2Х13 і Ст20 витримують тривалу експлуатацію в сплавах на основі цинку і магнію.

При використанні термопар основна складність полягає в пошуку такого розміщення гарячого спаю і підвідних проводів при якому в найменшому ступені порушувався б характер розподілення температури в об'єкті, що

контролюється при максимально можливому забезпеченні теплового контакту чутливого елементу термоприймача.

Найбільш розповсюджений контроль температури прес-форми в умовах ливарного цеху з допомогою стаціонарних, термопар, що не контактують з рідким металом. Для цього в обох пів-формах передбачуються місця для установки датчика. Звичайно відстань від гарячого спаю термопар до контактної поверхні складає 2 – 3 мм. Якщо не виникає загрози поломки форми, можна підвищити чутливість методу шляхом зменшення товщини стінки між спаєм і контактною поверхнею форми. Достатньо ефективним виявилось використання малоінерційної термопар з діаметром термоелектроду до 0,5 мм, котра вставляється в гніздо свердлення, що не доходить до контактної поверхні на 1 мм.

Конструктивно монтаж термопар для підвищення її чутливості може бути виконаний так, що гарячий спай термопар буде контактувати з металом, що заливається. Розміщуючи ізольовані термоелектроди в корпус з того самого матеріалу, що і прес-форма, гарячий спай термопар виводять на контактну поверхню, що забезпечує високу точність і мінімальну інерційність. Гарячий спай термопар припаюється латунню, або припоєм на основі заліза і марганцю до торця корпусу. Потім в зборі з формою шліфуванням видаляються залишки припою, поверхня покривається шаром нікелю або хрому товщиною 0,05 мм, який після цього полірується [13].

Процес заповнення форми при ЛПТ швидкоплинний (0,05 с), тому і тепловіддача в металічну форму протікає дуже швидко. Цей час неможливо порівнювати з інерційністю стандартних термопар. Використавши стрічкові елементи, товщиною 0,025 мм з шаром ізоляції 0,005 мм, вдалося довести інерційність термопар до 10 мс.

Основний недолік термопар, гарячий спай яких дотикається до рідкого металу – низька стійкість.

Переносні контактні термопар, наприклад термоелектричний термометр ТТЦ-1-02, забезпечує контроль температури поверхні форми без яких-небудь додаткових пристроїв.

Оскільки в деяких випадках виміряти безпосередньо параметр в заданій точці об'єкта технічно важко, а іноді взагалі неможливо, введення обчислювальної техніки в процес вимірювання на основі теоретико-експериментального моделювання фізичних полів дозволило вирахувати різноманітні величини в важко- та недоступних місцях об'єкту, а також в місцях, де датчики швидко виходять з ладу внаслідок їх руйнування агресивним високотемпературним середовищем.

Виробнича база багатьох ливарних заводів в даний час спирається на машини лиття під високим тиском (МЛПВТ) вітчизняного виробництва виготовлених в період з 60-х до 90-х років і потужністю від 60 до 5000 тонн. Надійне, просте в обслуговуванні та експлуатації обладнання, однак, не дозволяє виконувати пресування з високою точністю і стабільністю технологічних параметрів через низьку оснащеність засобами контролю та реєстрації параметрів процесу пресування і, як наслідок, отримувати деталі зі стабільними характеристиками. Крім того, відсутня можливість вести облік показників параметрів МЛПВТ і систем забезпечення, робити їх своєчасний аналіз для здійснення постійної роботи з удосконалення технології пресування деталей.

Для забезпечення високої, стабільної якості виробів і мінімальної кількості браку при литті під тиском в ході виробничого процесу слід застосовувати різні методи контролю властивостей виливків. Це пов'язано зі значними витратами і необхідністю проведення деяких випробувань в лабораторних умовах, на основі результатів яких можна коректувати процес лиття. Складний взаємозв'язок окремих технологічних параметрів ускладнює вибір відповідного керуючого впливу для усунення відхилення показників виливків від заданих значень. Особливо важко домогтися заданого рівня якості під час пускового періоду при поновленні виробництва після зупинки машини. Пусковий період, в залежності від виду виливка, може тривати кілька годин. Протягом усього цього часу випускається брак, а кваліфікований персонал зайнятий безперервним коригуванням параметрів процесу.

Для скорочення числа перевірок, спрямованих на підтримання заданої



якості виливка, необхідні контроль і регулювання тих параметрів, які безпосередньо визначають властивості виливка і піддаються вимірюванню в ході процесу.

Дослідження, проведені в останні роки, показали, що безпосередній вплив на якість виливки надають:

- температура розплаву;
- температура стінки прес-форми;
- швидкість пресування;
- тиск в прес-формі;
- деформація (знос) і герметичність пресформи.

Всі вони легко піддаються вимірюванню. Стабілізувати їх можна двома способами: підтриманням сталості вторинних параметрів, що впливають на них, і безпосереднім регулюванням. При цьому впливи по ступеням їх дії на якість виливки можна умовно розділити на 2 категорії. Категорія А: якість погіршується повільно, але незмінно протягом тривалого періоду часу. Основні причини – поступовий знос прес-форми, камери пресування, зміна температури стінки прес-форми, розплаву; в'язкості мастила в результаті старіння і забруднення; умов охолодження прес-форми; тиску мультиплікації.

Категорія Б: якість змінюється від циклу до циклу. Основні причини – коливання параметрів металу, що заливається, швидкості спрацьовування зворотного клапана, тривалості кожної з фаз пресування, швидкості запресовування металу, тиску мультиплікації.

Температура розплаву в роздавальній печі визначає коливання температури розплаву в прес-формі, відповідно, швидкості охолодження, а також динамічних і статистичних втрат тиску. Причому саме зміна втрат тиску особливо сильно впливає на відтворюваність якості виливка.

Основними умовами підтримки постійного рівня температури розплаву в печі є: точна настройка регулятора температури нагрівачів.

Температура стінки прес-форми. Коливання цього параметра обумовлюють неоднорідність структури виробів, а також зміни їх маси і

розмірів. Вони викликані значною тепловіддачею через кріпильні плити машини (в період пуску); зміною температури навколишнього середовища і пов'язаним з нею витратою охолоджувальної рідини (внаслідок зміни частоти обертання відцентрового насоса термостата при коливанні напруги в мережі або в результаті зменшення діаметра каналів при забрудненні системи охолодження) і т.д.

Реєстрація температури стінки дозволяє також виявити вплив переривання циклу на цей параметр і якість виливка. Причини відхилення температури стінки форми від заданого значення можна встановити шляхом безперервного її контролю. Наприклад, циклічні коливання середнього рівня температури так само, як і великі коливання температури розплаву, вказують на нестійкість режиму регулювання в системі охолодження. Нерегулярні або тривалі зміни свідчать про коливання витрати охолоджувальної рідини, її температури, температури навколишнього середовища або тривалості циклу.

Оскільки багато параметрів впливають на температурне поле форми протягом тривалого періоду часу, відтворюваність температури її стінки при відсутності постійного контролю практично недосяжна. Це відноситься, зокрема до форм з декількома контурами охолодження, а також до великих форм [12, 13].

Тиск у формі надає найбільший вплив на якість виливка. До контрольованих параметрів в даному випадку відносяться тиск розплаву в самій формі, в камері пресування і тиск робочої рідини в гідросистемі. Відхилення тиску у формі від заданого значення на різних стадіях процесу формування виливка може бути викликано зміною швидкості пресування, температури розплаву і форми, моментів перемикавання тиску, оскільки ці фактори визначають умови заповнення форми, підживлення та охолодження розплаву. Коливання температури розплаву, швидкості пресування і маси металу можуть бути виявлені по зміні тиску в гідросистемі.

### 1.2.6. Системи комплексного контролю параметрів процесу

На сьогоднішній день створено достаньо велику кількість різноманітних пристроїв, що дозволяють комплексно відстежувати параметри системи при литті під тиском. Як приклад, можна розглянути пристрій, який є типовим представником серед систем автоматизованого контролю і реєстрації параметрів процесу пресування «DC 1000», розроблена компанією «EMTEC» (Німеччина) [14].

Система призначена для вимірювання, реєстрації та протоколювання параметрів процесу пресування, а також блокування роботи машини при виникненні аварійної ситуації.

Процес пресування полягає у витримці матеріалу в прес-формі при заданих значеннях тиску й температури протягом певного часу з наступним охолодженням з установленою швидкістю. Попередньо в прес-формі може бути створений вакуум.

Пресування виконується на робочому (уповільненому) ході плунжера МЛТ. Нагрівання і охолодження прес-форми здійснюється за допомогою підведення теплоносія (Масла або води) зі заданими значеннями тиску і температури.

Система «DC 1000» може здійснювати контроль і реєстрацію наступних технологічних параметрів і сигналів:

- тиск пресування (1 канал);
- рівень вакуумування прес-форми (1 канал);
- температура розплаву (1 канал);
- температура теплоносія на виході з прес форми (1 канал);
- температура прес-форми (4 канали);
- хід і швидкість пресуючого плунжера під час кожної фази пресування;
- час циклу;
- масу металу, що заливається;

Дискретні сигнали контролю та управління відповідають наступним подіям:

- закриття дверей kabіни пресування;
- включення пульта управління машиною лиття під тиском;

До складу системи «DC 1000» входять:

- пульт технолога ливарного цеху;
- пульт оператора МЛТ;
- система контролю параметрів пресування;
- первинні перетворювачі (датчики);
- мережеве обладнання.

Структурна схема системи контролю наведена на рис. 1.9:

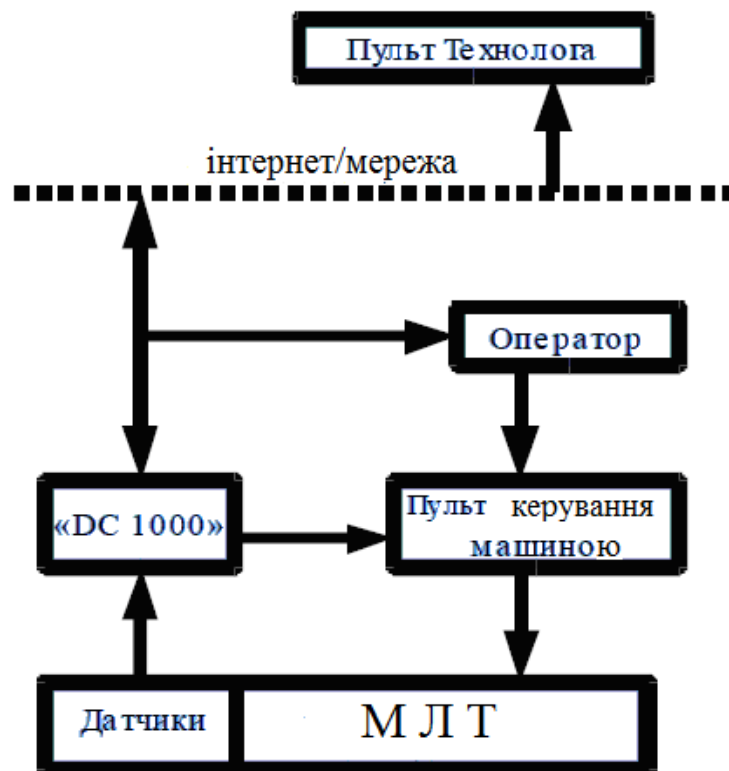


Рис. 1.10 Структурна схема роботи системи контролю параметрів пресування.

Пульт технолога являє собою персональний комп'ютер (ПК технолога) і призначений для ведення бази даних технологічних завдань пресування, а також контролю і документування їх роботи.

База даних технологічних завдань МЛТ являє собою набір технологічних установок, з якими, і тільки з якими, повинна проводитися

робота на даній МЛТ. База ведеться технологом цеху і недоступна оператору машини.

Пульт оператора машини лиття під тиском являє собою персональний комп'ютер, що використовується для реєстрації, протоколювання і блокування роботи машини в режимі реального часу.

Підсистеми контролю й управління являють собою спеціалізовані модулі віддаленого збору даних і призначені для вимірювання параметрів процесу пресування і блокування роботи МЛТ в режимі реального часу. Первинні перетворювачі (датчики) встановлюються на машині і служать для формування первинної інформації про її роботу.

Мережеве обладнання призначене для об'єднання ПК МЛТ і ПК технолога в локальну мережу за допомогою мережевого кабелю зв'язку або по захищеному радіоканалу.

Алгоритм роботи системи: перед початком роботи оператор МЛТ отримує від майстра технологічну карту на виготовлення деталі. У цій карті відображені наступні параметри:

- номер технологічної карти;
- час витримки металу під тиском (хв.);
- верхня і нижня межі тиску пресування ( $\text{кгс/см}^2$ );
- верхня і нижня межі температури нагріву прес-форми ( $^{\circ}\text{C}$ );
- швидкість охолодження прес-форми ( $^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ ).

Отримавши завдання, оператор включає МЛТ і встановлює зазначені параметри пресування. Дані про стан машини відображаються на дисплеї системи контролю "DC 1000", а також дублюються на моніторі ПК технолога. З цього моменту починається реєстрація та протоколювання параметрів процесу пресування. Потім оператор виконує наступні підготовчі операції:

- перевіряє прес-форму на відсутність дефектів;
- встановлює прес-форму на МЛТ;
- перевіряє перемикання з холостого на робочий хід плунжера МЛТ;
- проводить підготовку, перевіряє мастило і зборку прес форми;
- перевіряє працездатність датчиків тиску і температури;

- робить пробне запресовування (без металу).

Дані операції, за винятком останньої, виконуються при відкритих дверях kabіни пресування. Блокування роботи МЛТ на цьому етапі не проводиться. Потім двері kabіни пресування закриваються, і оператор з отриманої карти вводить в ПК МЛТ параметри технологічного процесу (завдання) [14].

З моменту початку технологічного процесу пресування при порушенні одного із заданого параметра пресування (виходу з встановленого поля допуску) спрацьовує світловий (звуковий) сигнал і, при необхідності, проводиться блокування роботи МЛТ. Далі оператор виконує роботи з усунення несправності. У якості пристроїв контролю застосовані наступні модулі віддаленого збору даних:

- датчик тиску (600 бар);
- датчик ходу поршня;
- датчик обнулення сигналу;
- датчик температури (термопара).

Відповідно до алгоритму роботи МЛТ розроблено спеціальне програмне забезпечення. Охарактеризуємо його основні складові.

- реєстрація та протоколювання параметрів процесу пресування;
- блокування роботи МЛТ при необхідності;
- діагностика наявності зв'язку з пристроями збору даних і управління, а також працездатності вимірювальних каналів;
- система статистичного аналізу даних дозволяє прогнозувати відсоток бракованих виливків.
- відключення по команді оператора деяких вимірювальних каналів в разі необхідності;
- світлова сигналізація про поточний стан вимірювальних каналів і режимах роботи програми.

Робота з базою даних технологічних завдань МЛТ здійснюється по мережі на ПК технолога. Відображувані параметри пресування можуть бути представлені як в табличному вигляді (рис. 1.11.), так і у вигляді графіка (рис. 1.12)

Die Cast Control - Example

File View Options

Filter:

DC measurements from: 10.05.2001 to: 10.05.2001 1d 1w 1m

Date	Time	MP no	Meas. point	Head data no.	Machine	Part no	Cast time t1	Delay time t2	Press. incr. time t3	Veloc. v1	Veloc. v2	Extrusion d	Max. pr
10.05.2001	14:34	999	Machine 6	10	MUELLER DECKEL	1234567	112.0 ms	26.0 ms	30.0 ms	0.39 m/s	2.22 m/s	30.5 mm	268.9 bar
10.05.2001	14:37	999	Machine 6	12	MUELLER DECKEL	12001200	58.0 ms	34.0 ms	18.0 ms	0.24 m/s	2.35 m/s	31.2 mm	181.0 bar
10.05.2001	14:45	999	Machine 6	0	MUELLER DECKEL	451325423	51.0 ms	9.0 ms	9.0 ms	0.16 m/s	4.58 m/s	37.7 mm	207.1 bar

Рис. 1.11. Дані, що відображаються на ПК технолога

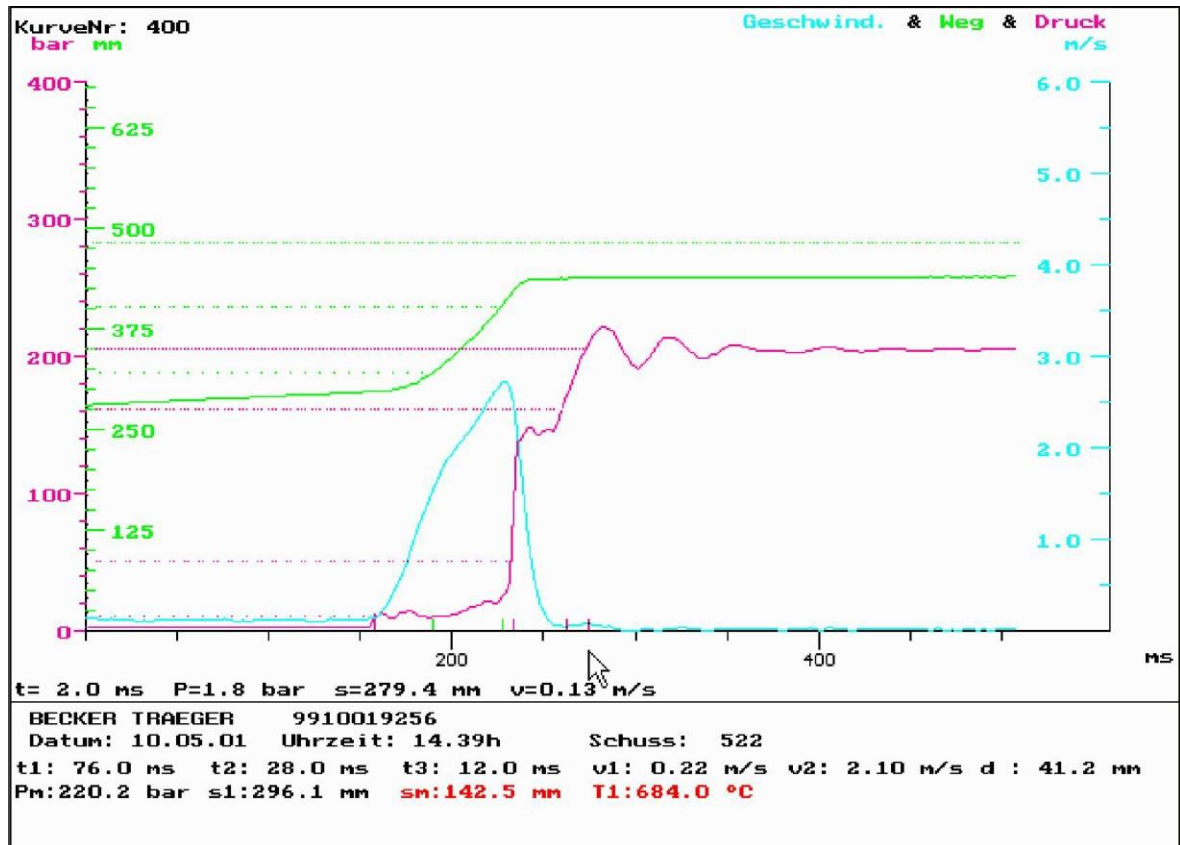


Рис. 1.12. Дані, що відображаються на дисплеї оператора.

### 1.2.7. Сучасні закордонні системи комплексної автоматизації для машин ЛПТ.

Системи контролю температури та тиску мають вирішальне значення для конструкції машини ЛПТ. До теперішнього часу не існує стандартних методів, які дозволяють отримати ідеальний виліток. На сьогоднішній день конструктор проектує обладнання та розробляє процес на основі емпіричних формул і власного досвіду. Для складних деталей, використовується ливарне моделювання для розробки ливникової системи. Зазвичай необхідно зробити значну кількість моделювань для того, щоб досягти задовільної поведінки заповнення форми. Цей інтерактивний і тому трудомісткий підхід робить

процес проектування дорогим і тягне за собою основну частину загальної суми витрат на проектування прес-форми. До тих пір поки ЛПТ використовується для масового виробництва це не є серйозною проблемою. Високі витрати на штампах компенсуються великою кількістю деталей, які виробляються за однієї матрицею [15].

Відправною точкою для оптимізації є чисельне моделювання ЛПТ. Дані моделювання використовується для оцінки заливки і кристалізації металу в прес-формі. Крім того, контролюються температурні параметри. Все це може бути досягнуто без використання дорогих експериментів. Ці розрахунки враховують всі процеси, включаючи систему контролю температури. На додаток до цього, необхідний критерій якості, що дозволяє оцінити загальну якість, так званої цільової функції. Метою оптимізації є мінімізація цієї цільової функції, яка розроблена в тісній співпраці з проектувальниками прес-форм.

Великою проблемою для оптимізації є чисельне моделювання процесу заповнення. З одного боку, процес заповнення триває всього частки секунди, а з іншого боку, потік металу є дуже складним. Через високі швидкості потоку-розплаву зазнає впливу високих тисків в діапазоні 300-1200 бар, а фронт розплаву лежить в області турбулентних потоків. Складність моделювання збільшується в міру охолодження розплавленого металу через зміни властивостей матеріалу, таких як щільність і в'язкість, що неминуче веде до збільшення обчислювальних витрат.

Було проаналізовано досягнення в сфері автоматизації лиття під тиском найбільших світових виробників обладнання для ливарної промисловості. Серед них такі як Buller, Toshiba, L.K. Machinery(NADCA).

**Toshiba Machine** випустила загалом більше 9.500 машин лиття під тиском, починаючи з 1953 року. З тих пір до теперішнього часу, машини для лиття під тиском цього виробника розроблялись у відповідності до потреб промисловості. Розглянемо далі технічні потреби і додані характеристики устаткування.



З 1971 року все частіше використовуються маніпулятори-знімачі на машинах ЛПТ, так як деталі стали більше за розміром і більш складної конфігурації. Через ефект збільшення швидкості уприскування та / або тиску пресування, часто виникає проблема виплескування металу в зазор між напівформами. Спеціально для складних конфігурацій виливків великого розміру, таких як автомобільні деталі і т.д., було розпочато розробку АСКТП для усунення викидів металу, що ускладнює автоматичні операції. Дослідження почалося для співвідношення між виникненням викиду і стрибком тиску (гідравлічний удар), і реалізували ідею контролювати запресування відповідно до кривої тиску, яка визначається кожен такт лиття під тиском. Були розроблені ливарні машини серії DC\*С засновані на цій ідеї. Найбільший успіх мали незалежні схеми для швидкості запресування і часу встановлення тиску, що дозволяє вибрати найкращі умови, що підходять для кожної литої деталі. В той же час, установка циліндру пресування була замінений на систему С-подібної станини, що набагато підвищило надійність машини. Крім того, для великогабаритних машин, система уприскування SELECTROL, що дозволило вільні вибори тиску уприскування циліндра

В 1983 р. розробка датчиків швидкості / тиску зі сталою часу однієї тисячної секунди, а також розробка програмного забезпечення керування дозволило з великою точністю відпрацювати базову технологія на машинах з зусиллям запирання в 350 тонн (3430kN). Після цього був розроблений



"SEMU" (Shot End Master Unit) , який поєднував елементи керування запирання/запресування та оснащений персональним комп'ютером, був широко прийнятий в промисловість.

*Рис. 1.13. Сучасна машина лиття під тиском з АСКТП(Toshiba)*

Починаючи приблизно з 1993 року, понад 50% великогабаритних ливарних машин були оснащені комп'ютерним керуванням. Через збільшення елементів управління і зростаючої потреби для

управління системою лиття під тиском в цілому була розроблена "TOSCAST" (Toshiba Machine Die Casting System Controller), який може контролювати кожен рух всієї машини, різні умови для запресування, зусилля запирання, автоматизувати контроль якості, управління технічним обслуговуванням, вирішувати проблеми діагностики, моніторингу і т.д. на базі 32-розрядного комп'ютера. Зараз від 60 до 70% машин, які виробляються фірмою Toshiba, оснащуються системою "TOSCAST". З моменту виникнення виливки стають все більш складними і високоточними, тому план технологічної оснастки, стан процесу і контроль якості повинні бути поставлені під жорсткий контроль. У майбутньому подальший розвиток буде пов'язаний з використання комп'ютера, розробкою та пошуком різних технологій, що прагне до зменшення участі людини в процесі на підприємстві в цілому [16].

Іншим виробником машин лиття під тиском **Buller** розроблено систему керування Datanet для машини лиття під тиском. За допомогою цієї модифікації, створюється система керування машиною ЛПТ з інтуїтивним інтерфейсом. Це останнє покоління систем управління є ще одним кроком від керування лише процесом лиття до автоматизованих ділянок ЛПТ. Перевагами системи є об'єктно-орієнтований інтерфейс, призначений для інтуїтивно зрозумілих додатків, а також можливість адаптації системи керування для задоволення індивідуальних вимог. На основі надійних компонентів системи управління та контролю модифікована система забезпечує більш високу ступінь експлуатаційної надійності. В результаті, система має підвищену продуктивність.

Можливості системи:

- Призначена для управління і моніторингу всієї ділянки лиття.
- Периферійне обладнання може бути інтегроване
- Керування в реальному часі.
- Можливість вибору режимів заповнення і тиску інтенсифікації
- Гарне прискорення і швидке уповільнення для оптимальне заповнення.
- Детальна діагностика.
- Сенсорний екран з швидким ключами доступу.

- Легке застосування через об'єктно-орієнтована призначений для користувача інтерфейс.
- Індивідуалізована конфігурації і можливе розширення.
- Мережеве з'єднання і інтерфейс USB для передачі даних.
- Гарантована доступність запасних частин.
- Ціна від 80 000 євро.

**RSE 10.x** система управління була розроблена для контролю машин лиття під тиском серії TOS вироблених RTS Rakovnik. Система управління забезпечує, крім контролю процесу лиття під тиском, також технологічну оцінку процесу лиття, обробку звітів процесу лиття, контроль дозатора металу, що керуються пристроєм обробки інформації або приєднані до системи збору даних. Блок керування має також повністю автономне живлення відокремлене на рівні аналогових сигналів. Силові виходи захищені від короткого замикання напівпровідниковими запобіжниками і сигналізацією.

Опис основних функцій системи керування:

- Робочий процес модифікації циклу здійснюється зміною параметрів, які організовані за рівнями;
- Оператори постійно отримують інформацію на дисплеї про поточний стан машини, хід робочого циклу, невиконані умови для виконання необхідної операції, збої і т.д;
- Модифікація швидкості процесу розливання здійснюється простим параметричним способом - зміна швидкості руху на лінії з можливістю негайного відображення ходу процесу;
- Пропорційно контролюється швидкість і тиск запірного пристрою, гідравлічний циліндру, прес-поршню і основних знімачів;
- Визначення положення запірного пристрою, поршню, висоти прес-форми і виштовхувачів індикаторами траєкторії;
- Читання і регулювання сили в окремих колонах, діагностика стану колон;
- Доступ до окремих пунктів меню забезпечується за ключовими словами з різними пріоритетами (електромеханічний, інструмент і т.д.);

- Графічне відображення реальних технологічних процесів (тиск, траєкторія і швидкість поршня і т.д.);
- Графічні процеси можуть бути відображені і надруковані на іншому ПК, що оснащено спеціальним програмним забезпеченням;
- Технологічні дані генеруються автоматично під час робочого циклу, які служать для документування процесу лиття;
- Система керування має інтегрований банк даних записів;
- Технологічні дані процесу лиття та інші дані, отримані в ході операції можуть бути збережені на дискеті і в подальшому опрацьовані на окремому комп'ютері. У разі інтеграції машини в автоматизовану систему збору даних вироблену ELAP, дані передаються через мережу передачі даних між системою управління машиною і центральним комп'ютером [17].

**LK Machinery** є одним з найбільших в світі виробників машин лиття під тиском, виробляючи більше 1500 машин на рік. Лінія машин цього виробника призначена для північноамериканського ринку. Використовуючи новітні технології, включаючи контроль запресування в режимі реального часу, L.K. здатні виробляти високоякісні машини ЛПТ.

Холоднокамерні машини для лиття під тиском дозволяють виробляти якісні виливки з алюмінієвих і магнієвих сплавів. Випускаються машини з зусиллям запирання від 100 до 4500 тонн. Машини ЛПТ з холодною камерою пресування оснащені електричні дверима безпеки і повним захисним огороженням. Вони включають передові технології, такі як пропорційне багатоступінчасту керування уприскуванням, використання подвійного важільного затискача і автоматичного регулювання висоти прес-форми.

Кожна машина забезпечує високу надійність, виняткову продуктивність і безперебійність обслуговування. Використовуються компоненти виробництва Allen Bradley, Bosch, Vickers і інших, що забезпечують швидке і просте обслуговування [2,17].

Таблиця 1.2. Порівняння можливостей існуючих закордонних АСКТП.

Можливості системи	<b>TOSCAST (Toshiba)</b>	<b>Datanet (Buller)</b>	<b>RSE 10.x (ELAP)</b>	<b>DC 1000 (Emtec)</b>
Автоматичний збір інформації	+	+	+	+
Керування процесом в замкненому режимі(робота без оператора)	+	+	--	--
Передача даних на інші пристрої	--	--	+	+
Повнота висвітлених параметрів процесу	+	+	+	+
Можливість встановлення на інший тип машини	--	--	--	+
Інтерфейс ПК	+	+	--	--

Таким чином на основі аналізу передових світових розробок в галузі можна зробити висновок, що не існує системи, яка повністю задовольняє умовам вітчизняної промисловості, є гнучкою, пристосовується для різноманітних типів машин ЛПТ, має досконалу обчислювальну систему, здатна співпрацювати з іншими периферійними пристроями. Тому актуальною є розробка вітчизняної системи керування процесом лиття під тиском в замкненому режимі з широкими межами регулювання та високою адаптивною здатністю.

## ВИСНОВКИ

- процес ЛПТ досить складний та багатогранний, параметри, що його характеризують, потребують ретельного контролю та регулювання з метою отримання найкращих показників якості виливків;

- системи контролю технологічних параметрів процесу недосконалі, і існує можливість мати більш ясну картину протікання фізико-хімічних процесів в системі та покращувати керованість підвищуючи інформативність приладів та враховуючи одночасний вплив параметрів;

- на вітчизняних підприємствах здебільшого автоматизація ЛПТ знаходиться на досить низькому рівні, а подекуди відсутня взагалі, тому моделювання деяких параметрів роботи машин лиття під тиском, а в кінцевому результаті цілісна автономна автоматична система керування технологічним процесом дає можливість різко підвищити якість виливків додатково зменшивши навантаження на операторів-ливарників;

- при встановленні АСКТП в цех лиття під тиском спостерігається позитивний економічний ефект, тому що зниження собівартості виготовленої одиниці литва зумовлюється зниженням енерговитрат на переплавлення металу в печі, зменшення кількості бракованих виробів по пористості, тріщинам та іншим дефектам, раціональному використанні змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР), та звуженню температурних інтервалів кристалізації, рідкого металу, та прес-форми;

- існує достатньо велика кількість розробок в сфері автоматизації ЛПТ, проте більшість вітчизняних розробок направлені на контроль лише окремих параметрів процесу і часто не знаходять промислового впровадження на підприємствах, а закордонні розробки повноцінних замкнутих систем керування мають більш вузькі межі керованих параметрів, та підвищено чутливі до випадкових збурень, розраховані на високу якість та відповідність хімічному складу та чистоті вихідних матеріалів, що в більшості випадків не досяжно для українських підприємств;

- керування окремими параметрами процесу ЛПТ не підпорядковане єдиному критерію, що в багатьох випадках призводить до погіршення якості виливків.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Характеристика устаткування

Дослідження технологічних закономірностей проводились на автоматизованих машинах лиття під високим тиском А711А07(А08), що призначені для виробництва виливків з кольорових металів та сплавів в цехах серійного та масового виробництва. В комплект автоматизованої машини входить машина лиття під тиском, маніпулятор для заливки металу, маніпулятор для змащування прес-форми, установка для змазки прес-плунжера. Машини можуть виконувати в налаштувальному та автоматичному режимі наступні операції: закривання двері, змикання прес-форми, заливка металу в камеру пресування, трифазне пресування, розкриття прес-форми, виштовхування виливка, розкриття дверей, змазування прес-форми, змазування прес-плунжера. Основні технічні характеристики машини:

- зусилля запирання прес-форми.....  $\geq 1600$  кН;
- хід рухомої плити..... 380 мм;
- відстань між колонами..... 450 мм;
- товщина прес-форми..... 220-500 мм;
- зусилля пресування..... 200 кН;
- зусилля гідровиштовхувача..... 120 кН;
- максимальна швидкість прес-поршня..... 5 м/с;
- час одного холостого циклу..... 9 с;
- діаметр наповнюваних стаканів..... 36-80 мм;
- найменша площа перерізу прес-форми у вертикальній площині..... 320x320 мм;
- максимальний тиск заpresовки..... 19,7 МПа.

Нагрів металу проводився в індукційній тигельній печі ІТП-0,4 з вмонтованим пристроєм контролю температури ТХА-0515. Операції заливання металу, витягування виливка та змащування прес-форми виконувались за допомогою маніпуляторів. Контроль пористості,

мікроструктури та хімічного складу проводився на електронно-скануючому мікроскопі ЕДАР в лабораторії електронної мікроскопії НТУУ «КПІ».

## 2.2. Характеристика виливків та обладнання для дослідження хімічного складу та структури.

Виливки корпусів щіткотримачів для електродвигунів залізничних електровозів виконуються з ливарного сплаву на основі міді ЛЦ40Сд. Такі виливки представляють собою досить складні різностінні виливки III-IV групи складності. Дефекти, що виникають при виготовленні такого роду деталей це газова пористість, розтріскування тонких стінок при охолодженні деталі, недоливи і т.п. Маса деталей коливається від кількох десятків грамів до 1,5 кг.



а



б



в

*Рис. 2.1. Латунні виливки з наявними на них дефектами (сліди від виштовхувачів (а, в), газова раковина (б)).*



Дослідження хімічного складу проводились на мультиелементному експрес аналізаторі складу сплавів "EXPERT 3L".

Призначення аналізатора: пряме вимірювання масової частки (концентрації) хімічних елементів у зразках металевих сплавів методом неруйнівного енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу (ЕДРФА) без використання еталонів.

Модель "EXPERT 3L" забезпечує кількісне визначення елементів від 12Mg до 92U в будь-яких типах сплавів (як стандартних, так і нестандартних) при виконанні більшості вимірювальних завдань металургії:

- сортування металевого брухту;
- вхідний контроль хімічного складу сировини;
- оперативний контроль складу металу в процесі його виплавки;
- вихідний контроль якості продукції і т.д.

Для більшості елементів в будь-яких типах сплавів діапазон виміру становить 0.01 – 99.5 %.

Табл. 2.1. Діапазони вимірювання для бронз, латуней і нікелевих сплавів

Хімічний елемент	Діапазон вимірювання (масова доля), % *в бронзах, латунях і нікелевих сплавах			
	Значення	Похибка	Значення	Похибка
Кремній	0,1	0,003	3,0	0,08
Сірка	0,02	0,07	0,5	0,03
Фосфор	0,08	0,015	0,5	0,03
Хром	0,1	0,012	30,0	0,12
Нікель	0,1	0,02	80,0	0,15
Мідь	0,03	0,01	4,0	0,04
Титан	0,06	0,02	3,0	0,08
Малібден	0,01	0,005	15,0	0,07
Ванадій	0,1	0,02	3,0	0,15
Вольфрам	0,05	0,01	20,0	0,15
Кобальт	0,2	0,08	60,0	0,2
Залізо	0,2	0,08	99	0,15
Марганець	0,1	0,02	20,0	0,2
Ніобій	0,01	0,005	3,0	0,04

Значення верхніх меж діапазону вимірювання, зазначені нижче в таблицях, взяті з відповідних ГОСТів і характеризують максимальний вміст елемента в даному типі сплаву, але не обмежують можливостей аналізатора. Практично для всіх наведених нижче елементів реальна верхня межа діапазону вимірювання знаходиться в межах 99.5 – 99.9. Прилад без додаткової реградуїровки аналізує також і нестандартні сплави, де діапазони вимірювання виходять за зазначені вище межі, а також зразки заздалегідь невідомого складу.

Стандартні зразки для вимірів не потрібні і можуть бути необхідні тільки при Державній повірці приладу.

### 2.3 Обробка даних

Інформативність контрольованих параметрів оцінювалась нами за методами регресійного аналізу. Задача відновлення залежностей вектора вхідних параметрів від вектора вихідних параметрів має ту особливість, що відсутність інформації про відновлену залежність заповнюється вибіркою її значень. Таблиця з  $n$  рядків та  $m + 1$  стовпців, де  $i$ -тий рядок інтерпретується як вектор  $(x, y) = (x_1, \dots, x_m, y)$  у  $(n + 1)$ -му просторі, є вихідною базою для використання будь-якого методу регресійного аналізу.

Будь-які (параметричні та непараметричні) методи побудови рівняння регресії засновані на припущенні, що дані в таблиці підпорядковані деякій функціональній залежності  $y = f(x)$ . Вирішення задачі параметричними методами складається з етапів:

- а) задання аналітичного вигляду  $\hat{y}$  оцінки залежності  $y = f(x)$ ;
- б) обчислення значень параметрів прийнятої оцінки за даними вихідної таблиці.

Оптимальна у понятті мінімуму середньоквадратичного критерію оцінка  $\hat{y}$  є нічим іншим, як умовним математичним сподіванням

$$\hat{y} = \hat{f}(x) = M(y/x). \quad (2.1)$$

Це дозволяє перенести задачу побудови оптимальної функції  $y = f(x)$  з області сумнівного пошуку її аналітичного вигляду та обчислення значень

параметрів оцінки по таблиці вихідних даних в область побудови умовного математичного сподівання  $M(x/y)$ . При цьому виключається необхідність підбору аналітичного вигляду оцінки  $\hat{y} = f(x, a)$ . Умовне математичне сподівання  $M(x/y)$  не відоме також, як і аналітичний вигляд функції  $y = f(x)$ . Однак методи математичної статистики за даними тільки вихідної таблиці забезпечують побудову оцінки  $M(x/y)$ , уникаючи апіорного завдання її аналітичного вигляду [41, 42].

Практичні задачі побудови регресії оперують з кінцевими по об'єму вихідними таблицями даних, на яких потрібно побудувати оптимальну в плані мінімуму оцінку вихідної змінної. Тому використовуємо тільки деякі, достатні для даних вимог обмеження, а саме: невід'ємність при будь-якому  $x$ , симетричність по відношенню до  $x_j$ , спадання по мірі  $x$  від  $x_j$ . У відповідності з непараметричним підходом до вирішення задачі побудови регресії по методу нормальних вкладів з кожним вектором вхідних параметрів вихідної таблиці зв'язується нормальний вклад, відображений у  $(m + 1)$ -мірному просторі вхідних і вихідних параметрів гіперповерхні, центром якої є відповідний вектор вихідної таблиці, а ширина (розмах нормального вкладу) визначається із досягнення оптимальності заданого критерію якості оцінки (середньоквадратичного відхилення).

Вхід у сферу регресійного аналізу об'єктів з найскладнішими залежностями вхід-вихід, до яких відноситься технологічний процес ЛПТ, обумовив розробку адекватних методів оцінювання залежностей. Насамперед це такі непараметричні методи, як метод потенційних функцій [12, 39], метод групового обліку аргументів [12] та метод нормальних вкладів [43]. Побудована по вихідній таблиці даних з використанням перерахованих методів оцінка у виявляється складніше залежності  $y = f(x)$ , що дозволяє забезпечити глибокий мінімум середньоквадратичного критерію.

Однак досягнутий мінімум критерію свідчить про те, що непараметрична оцінка оптимізована таким чином, що задаюча в  $(m + 1)$ -мірному просторі його

гіперповерхня дуже точно пройшла тільки через всі  $n$  точок (кінців вектора) вихідної таблиці. В інтервалах між точками вихідної таблиці відхилення оцінки від дійсної поверхні можуть бути непередбачуваними, так як середньоквадратичний критерій не контролює поведінку оцінки в точках, що не входять у склад вихідної таблиці даних.

Один з прийомів згладжування гнучкої оцінки невідомої залежності  $y = f(x)$  полягає в розчленуванні вихідної таблиці даних на навчальну і перевіірочну вибірки. Поверхня регресії конструюється за даними навчальної вибірки, а її якість оцінюється на перевіірочній вибірці за допомогою, наприклад, середньоквадратичного критерію. Якщо на якомусь кроці побудови оцінки така поверхня проходить через точки перевіірочної вибірки з точністю, при якій критерій приймає задовільне значення, то завдання побудови оцінки залежності  $y = f(x)$  об'являється вирішеним.

Нами використаний інший підхід до формування навчальної вибірки [12]. Встановлюється об'єм  $n_1 < n$  навчальної вибірки. По черзі, починаючи з першого рядка, розглядаються вектори вихідної таблиці як претенденти на включення до складу навчальної вибірки. Рішення про включення чергового вектора в навчальну вибірку здійснюється за допомогою обчислювальної процедури. Нехай до  $[\tau]$ -го кроку сформована вибірка  $V[\tau]$  з  $n$  векторів. На  $[\tau + 1]$ -му кроці наступний вектор  $x[\tau + 1]$  вихідної таблиці вводиться у склад  $V[\tau]$  та одночасно виключається перший вектор  $x_1$ . На утвореній таким чином вибірці складу  $V[\tau + 1]$  будуються оцінки вихідної змінної

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^n y_j \exp[-d^2(x, x_j)/2\sigma_j^2] / \sum_{j=1}^n \exp[-d^2(x, x_j)/2\sigma_j^2]. \quad (2.2)$$

Отримана регресія використовується для обчислення значення критерію  $I(V[\tau + 1])$  для всіх векторів вихідної таблиці. Після цього вектор  $x_1$  повертається в склад  $V[\tau + 1]$ , виключається другий вектор  $x_2$  та процедура повторюється для всіх векторів вибірки  $V[\tau + 1]$ . Серед отриманих  $n_i + 1$  значень критерію обирається найменший та найбільший та відповідний йому склад вибірки на даному  $[\tau + 1]$ -му кроці її формування. Формально процедура виглядає так:

$$V[\tau + 1] = V[\tau] + x[\tau + 1] - x_q, \quad (2.3)$$

якщо

$$I(V[\tau + 1]) > I(V[\tau]), \quad (2.4)$$

або в протилежному випадку

$$V[\tau + 1] = V[\tau], \quad (2.5)$$

де  $x_q \subset V[\tau + 1]$  –  $q$ -й вектор навчальної вибірки, що претендує на виключення на  $[\tau + 1]$ -му кроці переукомплектування її складу.

При відновленні заздалегідь нелінійної функціональної залежності у формі степеневого ряду

$$y(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i x^i \quad (2.6)$$

досягнена точність визначається кількістю членів ряду  $N_i$ ; ,чим менше область коливання змінної  $x$ , тим менше може бути  $N$ . На практиці часто обмежуються лінійним наближенням, звужуючи при цьому область варіювання вхідної змінної.

Якщо відновлюється функція багатьох змінних  $y(x_1, x_2, \dots, x_m)$ , вираз (2.6) суттєво ускладнюється

$$y(x_1, x_2, \dots, x_m) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i x_i + \sum_{i,j=1}^{C_m^2} \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,k=1}^{C_m^3} \alpha_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (2.7)$$

Для відновлення цієї залежності потрібно значно збільшити об'єм даних. У випадку нелінійної функції багатьох змінних також можна обмежитися лінійними членами, але при цьому звуження області варіювання вхідних змінних є значнішим.

При побудові математичної моделі процесу ЛПТ лінійне наближення функцій багатьох змінних є незадовільним. Нестационарність процесу не дозволяє накопичувати експериментальні дані великого об'єму, та функціональна залежність  $y(x_1, x_2, \dots, x_m)$  повинна бути відновлена по короткій вибірці даних [39]. Тому безпосереднє використання розкладання функції у

степеневий ряд (2.6) є практично неприйнятним. Для вирішення задачі відновлення нелінійної функціональної залежності по вибірці обмеженого об'єму використовували метод граничних спрощень (МГС) [40].

При вирішенні будь-якої задачі навчання розпізнаванню образів відновлюється значення індикаторної функції

$$y = F(x) \quad (2.8)$$

у багатомірному просторі ознак

$$x = X(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (2.9)$$

де  $y$  – скаляр;

$x$  –  $m$ -мірний вектор, що робить задачу схожою з задачею відновлення функціональної залежності.

В тому чи іншому випадках передбачається, що задана випадкова чи незалежна вибірка з пар  $(y, x)$

$$\chi = |(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_l, x_l)|. \quad (2.10)$$

Необхідно по вибірці  $\chi$  відновити залежність (2.8) у деякому класі функцій  $F(x, \alpha)$ , де  $\alpha$  – вектор параметрів. Для цього запропоновано використовувати МГС, основна ідея якого полягає в тому, що замість відновлення складної розділюючої функції здійснюється синтез такого простору ознак малої розмірності, в якому образи, що задані навчальною вибіркою, розділяються безпомилково лінійною по параметрам функцією  $F(x)$ . Задача відновлення функції по вибірці може бути зведена до задачі навчання розпізнаванню образів введеннями величини допустимого відхилення  $\varepsilon$

$$\max_{\alpha} [y - F(x, \alpha)] \leq 2\varepsilon \quad (2.11)$$

та формування двох класів  $V_1$  та  $V_2$  шляхом введення прирощень

$$Y_{V_1} = Y_V + \varepsilon, \quad (2.12)$$

$$Y_{V_2} = Y_V - \varepsilon \quad (2.13)$$

при фіксованих значеннях  $x$ .

Тоді навчальна вибірка збільшиться вдвічі та розділиться на підмножини  $\chi_1$  та  $\chi_2$ , одна з яких містить елементи  $(x_V, Y_{V_1})$ , а друга – елементи  $(x_V, Y_{V_2})$ .

Підмножини  $\chi_1$  та  $\chi_2$  можна розглядати як образи відповідно  $V_1$  та  $V_2$ , для розділення яких можуть бути використані методи навчання. В результаті отримаємо деяку розподільну функцію  $y = F(x, \alpha)$ , що гарантує виконання (2.11) для всієї навчальної вибірки з частотою, що дорівнює частоті достовірного розпізнавання образів  $V_1$  та  $V_2$ . У процесі навчання синтезується такий простір нових ознак, в якому образи  $V_1$  та  $V_2$  розділені лінійною функцією. Тоді й функція відновлення  $y = F(x, \alpha)$  у синтезуючому просторі комбінованих координат також буде лінійною, хоча у вихідному просторі вона може бути суттєво нелінійною. Це пояснюється тим, що координатами простору можуть виявитись будь-які члени поліному (2.7). Якщо множини  $V_1$  та  $V_2$  безпомилково розділені на навчальні послідовності, то на жодній точці цієї послідовності не буде порушена нерівність (2.11).

Відновлення залежностей при наявності перешкод в умовах коротких вибірок суттєво відрізняється від класичних проблем відновлення по вибіркам великого об'єму. Особливість в тому, що при обмеженому об'ємі вибірки якість відновлення функції, що схильна до перешкод, залежить не тільки від точності апроксимації емпіричних даних, але і від складності та розмірності апроксимуючої функції. Чим вище складність цієї функції та чим вище розмірність простору, в якому функція конструюється, тим гірше екстраполяційні властивості відновлюваної функції при фіксованому об'ємі вибірки, тобто тим гірше ця функція працює на нових даних, що не беруть участь у процесі відновлення.

В основі методу відновлення індикаторної функції лежить метод мінімізації емпіричного ризику [41], що призводить до успіху, якщо клас, в якому ведеться відновлення, є достатньо вузьким. Іншими словами, якщо ємнісна характеристика класу мала в порівнянні з об'ємом навчальної вибірки  $l$ , то метод мінімізації емпіричного ризику дозволяє обрати функцію, близьку до найкращої в класі.

Мінімізується емпіричний функціонал  $I_e$ , побудований по випадковій та незалежній вибірці

$$I_e(\alpha) = (1/l) \sum_{v=1}^l [y_v - y(x_v, \alpha)]^2, \quad (2.14)$$

де  $y_v$  – шукана функція;

$y(x_v, \alpha)$  – функція, що конструюється.

Для МГС при оцінці середнього ризику використовували нерівність

$$I_e(\alpha) \leq (\ln N - \ln P)/2l, \quad (2.15)$$

де  $N$  – кількість елементів множини;

$P$  – ймовірність.

Для оцінки величини  $N$ , що відповідає безперервному простору ознак та лінійному вирішуючому правилу, використали наступне співвідношення

$$N < 2^{n_0} C_n^{n_0}, \quad (2.16)$$

що призводить до нерівності

$$\ln N < n_0(\ln n + \ln 2) + \ln l + 1, \quad (2.17)$$

де  $n_0$  – розмірність побудованого простору ознак;

$n$  – число властивостей, з яких обрано  $n_0$  ознак;

$l$  – розмір вибірки.

При відновленні лінійної функції багатьох змінних вирішуюче правило збільшували ще на один множник по причині наявності нелінійності

$$N < 2^{n_0} C_n^{n_0} l^{m_0}, \quad (2.18)$$

де  $m_0$  – найбільша величина показника ступеня поліному.

Якщо обмежити показник ступеня поліному та прийняти його рівним числу ознак, то отримаємо нерівність

$$\ln N < n_0(\ln n + 2\ln 2 + \ln l) + 1. \quad (2.19)$$

Як видно зі співвідношення (2.19), зростання числа вхідних змінних  $n$ , з яких формуються ознаки, не сильно впливає на величину  $N$ , так як входить у співвідношення під знаком логарифму. Формування складної ознаки як добутку простих змінних призводить до суттєвого росту величини  $N$ . Найбільший вплив на  $N$  надає величина гранично допустимого числа складних ознак і показник ступеня полінома.



Отримане співвідношення може бути використано для оцінки гранично допустимого числа складних ознак, тобто число членів степеневого ряду виду (2.7), при якому помилка відновлення функції за вибіркою довжини  $l$  з ймовірністю не нижче  $1 - P$  не перевищує  $\varepsilon$

$$n_0 \leq (l\varepsilon + \ln P - \ln l - 1)/(\ln n + \ln l + \ln 4). \quad (2.20)$$

Якщо обмежитися одним членом ряду (2.7), то можна отримати оцінку мінімальної довжини навчальної вибірки  $l_0$

$$l_0 - 2\varepsilon \ln l_0 \geq (\ln n - \ln P)/\varepsilon + \ln 12/\varepsilon. \quad (2.21)$$

При проведенні статистичного аналізу експериментальних даних перевірялося порогове значення для довжини вибірки, за якою відновлюється функція.

При відновленні статистичної моделі методами регресійного аналізу оперують з випадковими величинами, значення яких протягом усього часу проведення кожного дослідження залишаються постійними. Однак більшість випадкових величин, що характеризують протікання технологічного процесу, безперервно змінюються в часі (динамічна модель), тобто маємо справу з випадковим процесом, який можна розглядати як систему, яка складається з нескінченної кількості випадкових величин, що являються, у свою чергу, перетином випадкового процесу для певного фіксованого моменту часу.

Математичне сподівання випадкового процесу  $x(\tau)$  є не випадкова функція  $m_x(\tau)$ , яка при кожному значенні аргументу  $\tau$  дорівнює математичному сподіванню відповідного перерізу випадкової функції

сподіванню відповідного перерізу випадкової функції

$$m_x(\tau) = M[x(\tau)] = \sum_{i=1}^n x_i(\tau)/n. \quad (2.22)$$

Аналогічно визначають дисперсію випадкового процесу

$$D_x(\tau) = D[x(\tau)] = M[x(\tau) - m_x(\tau)] = \sum_{i=1}^n [x_i(\tau) - m_x(\tau)]^2/(n-1), \quad (2.23)$$

де  $n$  – число окремих реалізацій випадкового процесу.

Двох зазначених вище характеристик недостатньо для опису випадкових процесів, так як вони, маючи однакові математичні сподівання і дисперсії,

можуть мати різний характер зміни. При плавній зміні значень параметрів у часі можна з досить великою ймовірністю прогнозувати їх значення в момент  $\tau_2$  по їх значенням у момент  $\tau_1$ , тобто спостерігається велика ступінь тісноти зв'язку між перерізами випадкового процесу для різних моментів часу. При різкій зміні значень параметра у часі неможливо зі скільки-небудь великою ймовірністю передбачити його поведінку в майбутні моменти часу, тобто ступінь зв'язку між перерізами випадкового процесу для різних  $\tau$  швидко згасає із збільшенням інтервалу  $\tau_1 - \tau_2$ .

Ступінь зв'язку між перерізами процесу в різні моменти часу характеризується кореляційною функцією  $K_x$ , яка визначається як невинадкова функція двох  $\tau_1$  та  $\tau_2$

$$K_x(\tau_1, \tau_2) = M[x_0(\tau_1), x_0(\tau_2)], \quad (2.24)$$

де  $x_0(\tau_1)$ ,  $x_0(\tau_2)$  – центровані значення для двох перерізів випадкового процесу в моменти часу відповідно  $\tau_1$  та  $\tau_2$

$$x_0(\tau_1) = x(\tau_1) - m_x(\tau_1), \quad (2.25)$$

$$x_0(\tau_2) = x(\tau_2) - m_x(\tau_2). \quad (2.26)$$

Оцінка кореляційної функції для двох перерізів  $\tau_1$  та  $\tau_2$  випадкового процесу  $x(\tau)$  приймає вигляд

$$K_x(\tau_1, \tau_2) = \sum_{i=1}^n [x_i(\tau_1) - m_x(\tau_1)][x_i(\tau_2) - m_x(\tau_2)] / (n - 1) \quad (2.27)$$

Для ергодичних процесів кореляційна функція, що визначається по одній реалізації, є математичне сподівання добутку значень випадкового процесу, узятих з інтервалом часу  $\tau$ ,

$$K_x(\tau) = M[x_0(\tau)x_0(\tau + \Delta\tau)]. \quad (2.28)$$

При цьому оцінка кореляційної функції, одержувана усередненням зазначеного вище добутку координат для однакових інтервалів  $\tau$  між перерізами випадкового процесу, визначається із співвідношення

$$K_x(\tau) = [1/(\tau - \Delta\tau) \int_0^{\tau - \Delta\tau} [x(\tau) - m_x(\tau)][x(\tau + \Delta\tau) - m_x(\tau)]d\tau]. \quad (2.29)$$

Переходячи до нормованих значень кореляційної функції, маємо

$$r_x(\Delta\tau) = K_x(\Delta\tau)/\sigma_x^2 = K_x(\Delta\tau)/D_x. \quad (2.30)$$

При  $\Delta x = 0$ ,  $K_x(\Delta\tau) = D_x$ ,  $r_x(\Delta\tau) = 1$ ; при  $\Delta x \rightarrow \infty$ ,  $r_x(\Delta x) \rightarrow 0$ , тобто зі збільшенням інтервалу часу ступінь тісноти зв'язку між перерізами випадкового процесу зменшується.

Перебіг процесу визначається сукупністю випадкових величин. Така сукупність характеризується математичним сподіванням кожної випадкової величини та їх взаємною кореляційною функцією, яка є не випадковою функцією двох аргументів  $\tau_1$  та  $\tau_2$ , і обумовлює зв'язок між перерізом випадкового процесу  $x(\tau)$  для  $\tau_1$  та перерізом випадкового процесу  $y(\tau)$  для  $\tau_2$

$$K_{xy}(\tau_1, \tau_2) = M[x_0(\tau_1)y_0(\tau_2)]. \quad (2.31)$$

Вираз для нормованої кореляційної функції має вигляд

$$r_{xy}(\Delta\tau) = K_{xy}(\Delta\tau)/(\sigma_x\sigma_y). \quad (2.32)$$

За зсувом по осі  $\tau$  максимуму графіка взаємної кореляційної функції відносно початку координат судять про величину інерційності чи запізнювання в об'єкті, якщо один із випадкових процесів  $x(\tau)$  є його входом, а інший  $y(\tau)$  – виходом [39].

## РОЗДІЛ 3. СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ. ПІДСИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ЯК СКЛАДОВІ ЧАСТИНИ АСКТП.

### 3.1. Формулювання критерію якості керування

Технологічний процес машини ЛПТ вирізняється швидкістю та циклічністю операцій, підвищеними вимогами до точності та своєчасності регламентованих керуючих впливів при отриманні виливків, різноманіттям обладнання. Передача функцій автоматизації технологічного процесу значно підвищує функціональні можливості АСКТП, якість інформації, що отримується і ефективність автоматизації процесу в цілому [44].

АСКТП машини ЛПТ функціонує в темпі з процесом, тобто в реальному часі (онлайн), що створює підвищені вимоги до швидкості роботи операційного пристрою, особливо в період підпресовки.

В якості критерію керування вибрано коефіцієнт первинного виходу виливків,  $k$ , що дорівнює

$$k = n_{\text{пр}} / n_3, k[0 \div 1] \rightarrow \max. \quad (3.1)$$

де  $n_{\text{пр}}$  – кількість придатних виливків,

$n_3$  – загальна кількість виливків.

Критерій цільової функції керування об'єктом можна охарактеризувати якістю продукції – зовнішнім виглядом поверхні виливка та її поруватістю. Зовнішній вигляд виливка як сумарний критерій може бути представлений у вигляді виразу, що враховує важливість дефектів

$$y_1(M) = B_1 / (1 + K_T + K_M + K_{\text{НП}} + K_3 + K_v + K_d + K_C), \quad (3.2)$$

де  $y_1(M)$  – сумарний критерій якості виливка, що враховує зовнішній вигляд його поверхні для  $M$ -го циклу, бал;

$B_1$  – критерій якості ідеального виливка без дефектів, бал;

$K_T, K_M, K_{\text{НП}}, K_3, K_v, K_d, K_C$  – коефіцієнти присутності відповідно тріщин, недопресовки, задернів, вириву, деформації й слідів змазки.

До найважливіших параметрів технологічного процесу лиття під тиском

відносяться: тривалість заповнення прес-форми розплавом; швидкість надходження розплаву в прес-форму; розміри та розташування вентиляційних каналів; кількість та властивості мастильного матеріалу; температури розплаву та прес-форми.

**Тривалість заповнення прес-форми** залежить тільки від товщини виливка і не залежить від її конфігурації, розмірів та маси. Але в умовах інтенсивного теплообміну між розплавом і прес-формою час перебігу перших порцій розплаву в робочі порожнини обмежена часом, після якого можливе утворення незлитин.

**Швидкість надходження розплаву в прес-форму**, визначаючи характер його руху (ламінарий, з високою турбулентністю або дисперсний), впливає не тільки на якість виливка, а і на довговічність прес-форми. Так занадто висока швидкість розплаву підвищує ймовірність змиву мастильного матеріалу з робочих поверхонь прес-форми, ерозійного впливу на її стінки і, як наслідок, приварювання виливка до прес-форми. Під час вилучення виливка це може призвести до поломки прес-форми, викривлення, утворення тріщин або руйнування. Робота при низьких швидкостях розплаву, як правило, не забезпечує високої якості поверхні виливків.

**Температура прес-форми** перед заливанням призначається з урахуванням складу сплаву, конфігурації виливка, товщини її стінки. Вона має складати для цинкових сплавів 120 – 160 °С, для магнієвих 200 – 240 °С, для латуні 280 – 320 °С та для алюмінієвих сплавів 180 – 250 °С. Для виливків з меншою товщиною стінки та складної конфігурації температуру призначають ближче до верхньої межі і навпаки. Дотримання цього принципу дозволяє при виготовленні тонкостінних виливків поліпшити заповнення форми розплавом, а для масивних – підвищити швидкість затвердіння та зменшити кількість усадкових дефектів. Для регулювання температурного режиму прес-форми в їх конструкції передбачено системи охолодження або теплової ізоляції окремих елементів прес-форми.

**Температура заливання** розплаву залежить від хімічного складу сплаву, конфігурації та розмірів виливка, режиму заповнення прес-форми. Підвищена

температура заливання спричиняє закупорення вентиляційних каналів і як наслідок підвищення пористості, недолив. Також збільшується обсяг усадочних дефектів, підвищується тривалість затвердіння та охолодження виливка, знижується продуктивність машини та стійкість прес-форми.

**Тиск пресування** залежить від товщини стінки виливка, його розмірів та конфігурації. Чим більша товщина стінки виливка, тим вищий тиск необхідно прикласти для забезпечення його якісних характеристик.

**Масильні матеріали**, що використовуються в литті під тиском захищають робочі поверхні прес-форм від хімічного, механічного, теплового впливу струменя розплаву, запобігають приварюванню виливка до прес-форми та знижують зусилля вилучення виливка. Вони мають бути нетоксичні, недифіцитні, мати мінімальну газотвірну здатність при високих температурах та не пошкоджувати поверхню прес-форми.

*Таблиця 3.1. - Дефекти виливків при литті під тиском*

Дефекти	Причини утворення	Попередження
Гарячі та холодні тріщини 	Затримка розкриття прес-форми, висока температура заливки металу, високий вміст шкідливих домішок, низька температура прес-форми, провисання прес-форми	Прискорити розкриття прес- форми, підвищити робочу температуру
Приварювання сплаву до прес-форми, вирив 	Низька твердість робочих поверхонь прес-форми	Відрегулювати подачу змащення

<p>Задирні на поверхні виливків, подряпини</p> 	<p>Місцевий перегрів прес-форми, неспівпадіння осей напівформ, зношення робочої поверхні</p>	<p>Відрегулювати симетричність прес-форми</p>
<p>Облой, запливи</p> 	<p>Витіснення металу в проміжок між напівформами, недостатнє зусилля запирання</p>	<p>Налагодити системи запирання, перевірити змикання напівформ</p>
<p>Газові раковини і поруватість</p> 	<p>Висока швидкість пресів, закупорення вентиляційних каналів, нераціональна конструкція ливникової системи, підвищена кількість змащення</p>	<p>Низька швидкість пресування, зменшити кількість змащення, поліпшити ливниково-вентиляційні системи</p>
<p>Недолив, незлитина</p> 	<p>Низька температура заливання, знижена швидкість подачі металу, недогріта прес-форма</p>	<p>Підвищити температуру розплаву та швидкість заливання, змінити параметри охолодження прес-форми</p>
<p>Нечіткі контури вилівка, невідповідність геометрії вилівка</p> 	<p>Низький тиск пресування, знижена температура прес-форми, недостатній переріз живильника</p>	<p>Підвищити тиск пресування, робочу температуру</p>
<p>Сліди від виштовхувачів</p> 	<p>Недотримання норми часу витримки, підвищена температура прес-форми</p>	<p>Змінити час витримки та параметри охолодження прес-форми</p>

Пористість виливка як сумарний критерій якості можна записати у вигляді виразу, що враховує важливість показників, по зонах

$$y_2(M) = B_2 / \left( 1 + \sum_{j=1}^s \frac{1}{1 - K_{MPJ}} + \sum_{q=1}^t K_{pq} + \sum_{i=1}^v K_{qE} \right) \quad (3.3)$$

де  $y_2(M)$  – сумарний критерій якості виливка, що враховує його пористість для  $M$ -го циклу, бал;

$B_2$  – критерій якості ідеального виливка без пор, бал;

$K_{MPJ}$ ,  $K_{pq}$ ,  $K_{qE}$  – коефіцієнти, що характеризують відповідно місце розташування в  $j$ -й, розміри в  $q$ -й та число пор в  $i$ -й зонах виливка;

$s$ ,  $t$ ,  $v$  – числа зон ділення виливка за ознаками, що характеризують відповідно місце розташування, розміри та число пор.

Причинами виникнення дефектів виливка можуть виступати недотримання різноманітних параметрів процесу. Керування такими параметрами як дозування розплаву, температура розплаву, температура прес-форми, зусилля запирання, швидкість пресування та іншими відіграє визначаючу роль у формуванні якості отриманого виливка. Застосування вказаного критерію цільової функції найраціональніше при автоматичному контролі якості виливків за допомогою ЕОМ.

Аналіз процесу ЛПТ виявив  $n$  змінних параметрів  $X_i$  ( $i \in 1 \dots n$ ), які мають бути включені в математичну модель: температура металу в дозаторі ( $i = 1$ ) і прес-формі ( $i = 2$ ), тривалість витримки металу в камері пресування ( $i = 3$ ) і виливка в формі ( $i = 4$ ), тривалість нанесення змазки (маса змазки) ( $i = 5$ ) і обдувки стисненим повітрям локальних ділянок форми ( $i = 6$ ), швидкість пресування ( $i = 7$ ), піковий тиск підпресування ( $i = 8$ ) і тривалість його збільшення ( $i = 9$ ). Найвагоміший і повний компенсаційний параметр процесу – швидкість пресування [45].

Процес ЛПТ на  $N$ -му такті може бути описаний рівнянням:

$$y(N) = \sum_{i=1}^n h_i(N) x_i(N), \quad (3.4)$$

де  $y(N)$  – фактичне значення критерію якості виливка;

$h_i(N)$  – фактична оцінка  $i$ -го технологічного параметру процесу;



$x_i(N)$  – можливий компенсувальний вплив за  $i$  – м параметром.

Прогнозовану модель процесу на  $N$  – му такті знаходимо у вигляді:

$$y_*(N) = \sum_{i=1}^n h_i(N-1)x_i(N), \quad (3.5)$$

де  $y_*(N)$  – прогнозоване значення критерію якості виливка;

$h_i(N-1)$  – фактична оцінка  $i$  – го параметру на попередньому такті.

Уточнення оцінки  $i$  – го параметра проводимо за ітераційним алгоритмом

$$h_i(N) = h_i(N-1) + \frac{y(N) - y_*(N)}{\sum_{i=1}^n x_i^2(N)} x_i(N) \quad (3.6)$$

Підтримання заданої якості виливка засновано на принципі компенсації збурень технологічних параметрів, що з'являються на фіксованому такті роботи машини ЛПТ. Максимальний тиск машина повинна розвивати і зберігати в період від моменту закінчення заливки в порожнину прес-форми до моменту кристалізації металу в живильнику. В період, що обчислюється тисячними долями секунди, газ в порах набуває потрібного тиску, під яким потім знаходиться відключений від живильника затверділий вилівок. Зі збільшенням тиску зменшується об'єм пор у виливку. Пізнє підвищення тиску марне, адже затверділий метал живильника ізолює вилівок від джерела тиску. Раннє підвищення тиску збільшує швидкість струменя металу, що негативно відображається на стійкості прес-форми, але разом з тим покращує умови формування поверхні виробу.

Іншим керуючим впливом на якість поверхні виливка є змазка, що оберігає робочу поверхню прес-форми від налипання і приварювання рідкого металу, а в металопроводі – знижує коефіцієнт тертя і оберігає його від задернів та зносу. Шар змазки знижує температуру контакту, що в свою чергу підвищує стійкість форми, вкладишів та стержнів. Змазка з низькою теплопровідністю більш ефективно знижує температуру контакту.

При зміні теплових і гідродинамічних параметрів заповнення форми в виливках виникають дефекти у вигляді недоливів, незлитин, візерункової поверхні й газової пористості. При передчасному розкритті прес-форми

можливе пошкодження виливків виштовхувачами, адже метал при підвищеній температурі має знижену міцність. При литті сплавів, схильних до тріщиноутворення, неможна перетримувати виливок в прес-формі, так як при утрудненій усадці сплаву в виливку виникають тріщини.

Знаючи компенсуючі можливості параметрів, що впливають на якість виливка й їх значення в даному циклі, розрахуємо величину компенсаційного впливу

$$y_{**}(M) = h_1(M-1)x_1(M) + h_2(M-1)x_2(M) + \dots + h_i(M-1)x_i(M), \quad (3.7)$$

де  $y_{**}(M)$  – значення критерію якості, яке отримується при підстановці в рівняння моделі значень технологічних параметрів на  $M$ -ому циклі до такту пресування;

$h_1(M-1), h_2(M-1) \dots + h_i(M-1)$  – оцінки фактичних значень параметрів для такту пресування на попередньому циклі.

Приріст критерію якості, який необхідно компенсувати в даному циклі на такті пресування складає

$$\Delta y(M) = y - y(M), \quad (3.8)$$

де  $y$  – значення критерію якості, яке необхідно отримати.

Як показали дослідження, компенсувальний вплив на такті пресування найдоцільніше проводити сумарним впливом швидкості пресування, тиску підпресування та тривалості нарощування його пікового значення, тобто

$$\Delta y(M) = h_7(M-1)\Delta x_7(M) + h_8(M-1)\Delta x_8(M) + h_9(M-1)\Delta x_9(M). \quad (3.9)$$

Якщо прийняти  $\Delta x_7(M)$ ,  $\Delta x_8(M)$  і  $\Delta x_9(M)$  попарно рівними нулю, то можна записати

$$\Delta x_7(M) = \Delta y(M) / [h_7(M-1)]; \quad (3.10)$$

$$\Delta x_8(M) = \Delta y(M) / [h_8(M-1)]; \quad (3.11)$$

$$\Delta x_9(M) = \Delta y(M) / [h_9(M-1)]. \quad (3.12)$$

Тоді значення кожного з розглянутих компенсувальних впливів для даного циклу відповідно будуть рівними

$$x_7(M) = x_7(M-1) + \Delta x_7(M); \quad (3.13)$$

$$x_8(M) = x_8(M - 1) + \Delta x_8(M); \quad (3.14)$$

$$x_9(M) = x_9(M - 1) + \Delta x_9(M). \quad (3.15)$$

Далі розглянемо підсистеми керування такими важливими параметрами процесу як дозування розплаву, температурними параметрами процесу як у прес-формі, так і в плавильному агрегаті, зусилля запирання, швидкості прес-поршня та ін.

При описанні процесу ЛПТ та виборі цільової функції можливо використання залежностей максимізації (наприклад за виходом годного) або мінімізації (за собівартістю). В реальних умовах процесу можливо говорити лише про оптимізацію параметрів, що в свою чергу тягне за собою зміну як основних параметрів процесу, так і керуючих впливів на ці параметри не тільки до критичних меж максимуму або мінімуму. Тісно взаємопов'язані між собою, вони регулюються та впливають один на одний з метою визначення оптимальних умов функціонування системи в цілому. Наприклад, ми не можемо мінімізувати критерій по собівартості, тому що це неминуче призведе до зниження якості вихідної продукції. Так само неможливо досягти найвищих параметрів якості та одночасно вкластися за часом технологічного завдання та знижувати собівартість.

Сукупний критерій оптимізації представляємо у формі

$$I = \alpha_1\Pi + \alpha_2З + \alpha_3k \rightarrow \min, \quad (3.16)$$

де  $\Pi$  – продуктивність, кількість якісних виливків за проміжок часу;

$З$  – витрати на виробництво, грн.;

$k$  – вихід придатного, відношення кількості готових придатних виливків до кількості запресовок,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коефіцієнти, причому  $\alpha_1 < 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 < 0$ .

Права частина формули (3.9) була представлена через параметри керування, на межі зміни яких накладені технологічні обмеження. Для спрощення запису використано наступні заміни:

$X_1 = m_{Me}$  – кількість металу на один виливок з ливниковою системою (ЛС) та прес-залишком;

$X_2 = t_{Me}$  – температура металу в ємності;

$X_3 = v_{np}$  – швидкість пресування;

$X_4 = \tau_{вум}$  – час витримки металу в прес-формі;

$X_5 = P$  – тиск пресування;

$X_6 = t_{нф}$  – температура прес-форми;

При аналізі складових процесу були висунуті наступні обмеження:

$$\tau_3 V_{дет} < X_1 < \tau_3 (V_{дет} + V_{ЛС}), \quad (3.17)$$

де  $\tau$  – тривалість заливки,

$V$  – об'єми деталі та ливникової системи з прес-залишком відповідно,

$$T_{pn} + (\Delta T_k + \Delta T_{np} + \Delta T_{л}) \leq X_2 < (T_{pn} + (\Delta T_k + \Delta T_{np} + \Delta T_{л})) + 20^0 \quad (3.18)$$

де  $T_{pn}$  – температури роздаточної печі,

$\Delta T$  – теплові втрати в каналі МГД насосу, камері пресування та ливниковій системі відповідно.

$$X_3 \leq v_{кр}, \quad (3.19)$$

де  $v_{вн} = \sqrt{2p_{np} / (\rho_m (1 - f / F))}$  – швидкість впуску металу в форму,

$p$  – тиск пресування,

$\rho$  – густина металу,

$f$  та  $F$  – площа перерізу живильників та виливка відповідно;

$$v_{кр} = 59 \vartheta^{0,42} (\delta_{жив} / \delta_{вил})^{0,54}.$$

Тут  $\vartheta$  – в'язкість,  $\delta$  – характерний розмір перерізу живильників та виливка відповідно.

$$\tau_1 + \tau_2 \leq X_4, \quad (3.20)$$

де  $\tau_1 = \delta_0 + \delta_1 t_{роз} + \delta_2 t_{ф}$  – час охолодження деталі ( $\delta$  – коефіцієнти,  $t$  – температури розплаву та форми відповідно);

$\tau_2 = \beta_0 + \beta_1 t_p + \beta_2 l$  – час охолодження прес-залишку ( $\beta$  – коефіцієнти,  $t$  – температура розплаву,  $l$  – довжина прес-залишку)

$$\lambda_{ф} \rho_m \vartheta_m^2 l / (4 \delta_{вил}) \leq X_5 \leq \rho_m a_m \vartheta_m l_{ф} / (a_m \tau_{п} - l_{ф}), \quad (3.21)$$

де  $\lambda_{\phi} \rho_m g_m^2 l / (4 \delta_{вил})$  – величина зміни тиску в потоці металу ( $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічних опорів від шорсткості форми);

$\rho_m a_m g_m l_{\phi} / (a_m \tau_{\pi} - l_{\phi})$  – підвищення тиску в формі в момент гідравлічного удару;

$a$  – швидкість розповсюдження ударної хвилі в рідкому металі,

$l_{\phi}$  – довжина порожнини форми,

$\tau_{\pi}$  – тривалість перекриття потоку, що дорівнює 0,001 с.

$$T_k > X_6, \quad (3.22)$$

де  $T_k = (T_m b_m + T_{\phi} b_{\phi}) / (b_m + b_{\phi})$  – температура контактного шару форми ( $b$  – коефіцієнти теплової акумуляції металу і форми відповідно);

Оптимальні значення керуючих впливів  $X_1 \dots X_6$  визначали методом найшвидшого спуску [46].

Нижче розглянуто принципи, алгоритми та системи керування окремими операціями та характеристиками процесу.

### 3.2. Підсистема керування дозуванням розплаву

Автоматизація заливання форм розплавом підвищує якість виливків, знижує брак і трудомісткість процесу, зменшує масу прес-залишку. Ключова проблема автоматичної заливки форм – дозування розплаву, а в деяких випадках і регулювання швидкості заливання. В промислових масштабах використовуються різноманітні способи та пристрої дозування розплаву.

При подані розплаву під низьким тиском стиснутого повітря або інертного газу (рис. 3.1) метал із герметичної ємності 10 витісняється тиском газоподібного середовища, що вводиться через впускний 2 і випускний 3 клапани. Тиск газоподібного середовища визначається із умови

$$\rho g H_1 \leq p \leq \rho g H_2, \quad (3.23)$$

де  $\rho$  – густина розплаву, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – модуль вектора прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$H_1, H_2$  – висота рівнів розплаву, м.

Через зливний канал металопроводу 4 розплав подається в прес-форму. Точність дозування залежить від можливості забезпечення постійного напору металу внаслідок того, що в процесі наливу змінюється рівень розплаву. Крім того, необхідно підтримувати метал у режимі “зберігання” поблизу зливного каналу металопроводу 4 для зменшення тривалості дозування, виключити викид розплаву із дозатора при малій його масі. Пристрій працює наступним чином. Напруга від блока керування 17 поступає на перемикач 18, підключаючи задатчик рівня металу 23 до регулятора рівня 12 і задатчик тиску 19 до регулятора тиску 22. На задатчиках встановлені значення параметрів, що відповідають режиму “зливу металу”. Напруга, що пропорційна значенню тиску в трубопроводі продувки 5, поступає від вимірювача 9 на регулятор 22, де порівнюється із заданим тиском. У випадку перевищення заданого значення тиску спрацьовує випускний клапан 3. Цей клапан відключається при досягненні значення різниці тиску, що дорівнює допустимій. У випадку, якщо рівень тиску нижче заданого, спрацьовує впускний клапан 2. Напруга, що пропорційна рівню металу в трубопроводі продувки 5, з датчика рівня 1 поступає на регулятор 12, де порівнюється зі заданим значенням від задатчика 23. При низькому рівні металу в

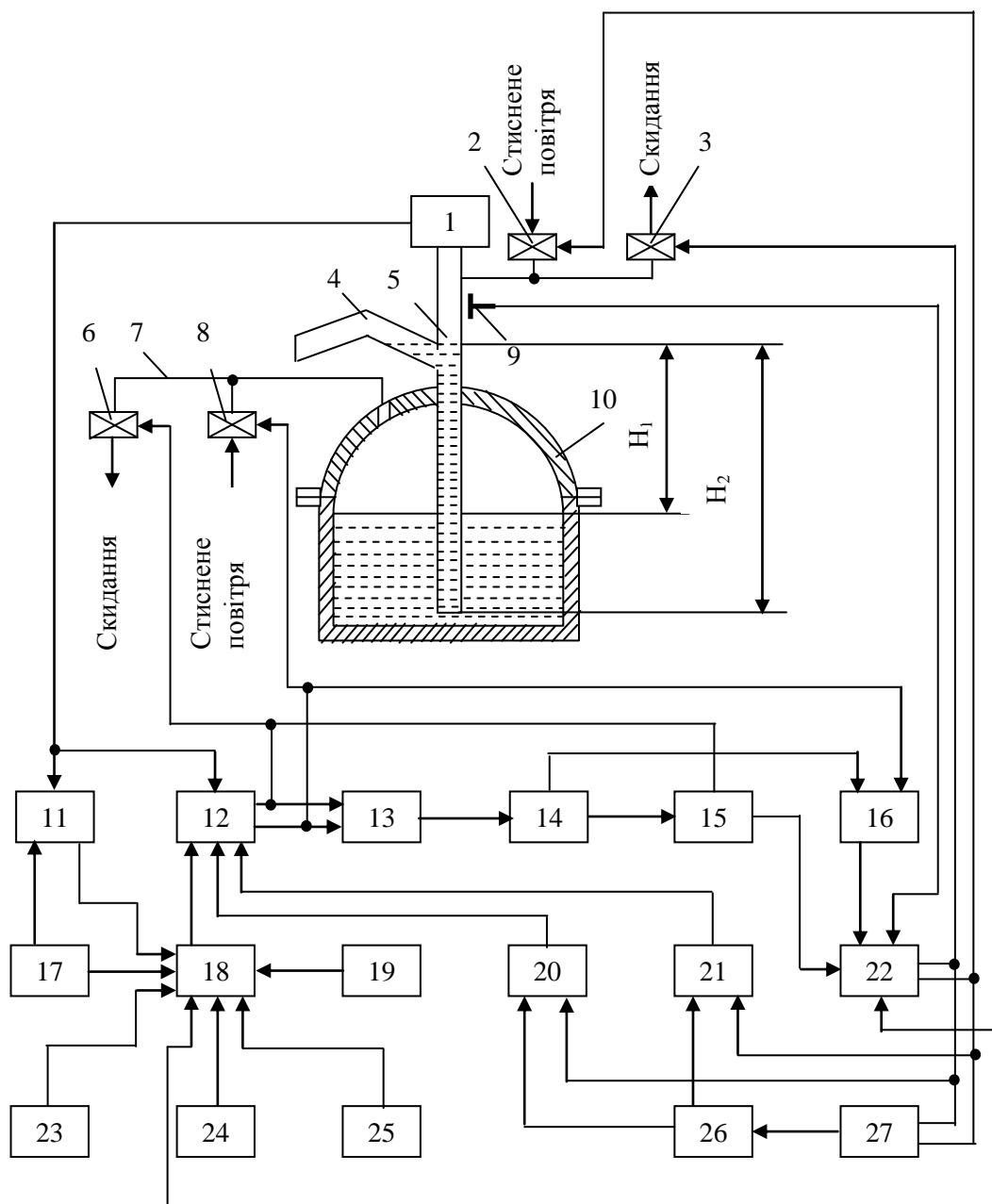


Рис. 3.1. Структурна схема пристрою для пневматичного дозування

трубопроводі продувки регулятор 12 включає впускний клапан 8 подання стиснутого повітря у ємність з дозатора 10. При високому рівні регулятор включає випускний клапан 6, з'єднуючи порожнину ємності з атмосферою. Коли рівень металу досягне значення, що відповідає рівню зливу, від датчика 1 поступає напруга на включення реле часу 11. Так як вимір тиску у трубопроводі продувки 5 клапанами 2 і 3 приводить до зміни рівня металу, вихідна напруга регулятора 22 через схему АБО 27, блок множення 26, де встановлено

масштабний коефіцієнт поступає на відповідні ключі 20 і 21, вихідні напруги яких поступають на регулятор 12 для одночасної зміни завдання на рівень металу.

При зміні рівня металу у трубопроводі продувки проходить аналогічна операція по ланцюгу регулятор 12 – схема АБО 13 – блок множення 14 – ключі 15 і 16 – входи регулятора 22. При закінченні тривалості злива спрацьовує контакт реле часу 11, видаючи напругу на перемикач 18, що підключає задатчик рівня металу 24 до регулятора 12, а задатчик тиску 25 до регулятора тиску 22. На задатчиках установлюються значення параметрів, що відповідають режиму –зберігання металу. Відпрацьовуючи значення параметрів, регулятори видають команду на перерву струменя металу.

Як датчик присутності металу на виході зливного трубопроводу (датчик рівня 1) застосовується датчик Метран-100 ДГ, як вимірювач тиску датчик Метран-100 ДИ, задатчики і обчислювальні блоки – стандартні блоки АКЕСР.

Випробування дозатора на Дослідному заводі НПО –НПСЛІІ (м. Одеса) показало, що його використання підвищує вихід корисного на 1,5 % (відповідно знижується частка поверненого металу), підвищується продуктивність дозатора (тривалість дозування знижується на 3 – 5 %). Однак в процесі випробувань виявлено, що цей пристрій має похибки внаслідок залежності витрати металу на початку і у кінці зливу від швидкості зростання тиску в ємності 10, а також з-за гідравлічного опору в місці з'єднання зливного каналу металопроводу 4 з трубопроводом продувки 5.

Далі розглянемо спосіб магнітодинамічного дозування розплаву (рис. 3.2). В цьому пристрої гідродинамічний опір зливного каналу контролюється за часом заповнення металом вільної його частини. Тривалість заливання заданої порції металу визначається за формулою

$$\tau_z = m_z \tau_\theta / m_\theta, \quad (3.18)$$

де  $\tau_z, \tau_\theta$  – тривалість заливання відповідно заданої порції металу та порції металу, що еквівалентна вільному об'єму металопроводу, с;

$m_z, m_\theta$  – маса відповідно заданої порції металу і порції металу,



еквівалентної вільному об'єму зливного металопроводу, кг.

Тривалість наливання порції металу, еквівалентної вільному об'єму металопроводу, визначається таймером, що приводиться в дію датчиком наявності металу на виході зливного металопроводу та зупиняється датчиком наявності металу на вході в прес-камеру.

Похибки, пов'язані з залежністю витрат на початку і кінці зливу металу від швидкості збільшення тиску, усуваються при подачі металу магнітодинамічним насосом (МДН), так як збільшення та зменшення витрат відповідно на початку та в кінці процесу відбувається практично миттєво. З тиглем 2 з'єднуються канали 3, 4 та 7, причому канали 3 та 7 охоплені індукторами, які являють собою замкнутий магнітопровід 8 з обмоткою живлення 9

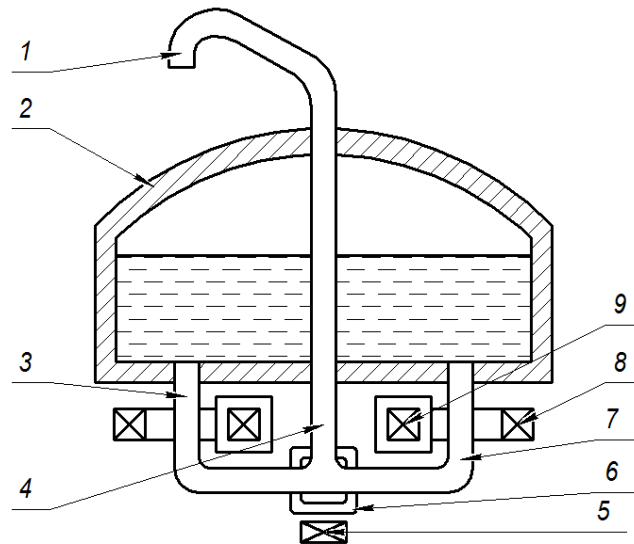


Рис. 3.2. Дозування розплаву за допомогою МДН

Активна зона МДН-дозатора розміщена в зазорі електромагніту, що має С-подібний магнітопровід 5 і обмотки живлення 6. При пропусканні електричного струму промислової частоти через обмотку індукторів у каналах 3 і 7 (як у вторинних обмотках трансформаторів) індукується струм. З увімкненням обмотки електромагніту на кожний елемент об'єму розплаву  $dv$ , що знаходиться в активній зоні, діє елементарна сила

$$dF = (B \cdot j)dv, \quad (3.19)$$

де  $dF$  – елементарна сила, Н;

$B$  – поверхнева густина магнітного потоку (магнітна індукція), Тл;

$j$  – поверхнева густина електричного струму в розплаві, А/м<sup>2</sup>;

$dv$  – елементарний об'єм розплаву, м<sup>3</sup>.

Сумарна дія елементарних сил викликає рух розплаву через вихідний металопровід 1 до приймача. У випадку стабілізації електричного і температурного режимів маса розплаву, що заливається у форму, виявляється пропорційною часу дії МДН. Недолік цього дозатора – великі витрати енергії, особливо в режимі "збереження металу".

Нами було досліджено комплекс робіт, присвячений методам дозування розплаву за допомогою магнітовагових установок, проведених на базі ФТІМС НАН України. В цих роботах представлено можливість суміщення магнітодинамічного дозування з безперервним контролем змінної маси металу. Та реалізували спосіб дискретного дозування розплаву з відокремленням маси безпосередньо з МДУ до ливарної форми[48...55].

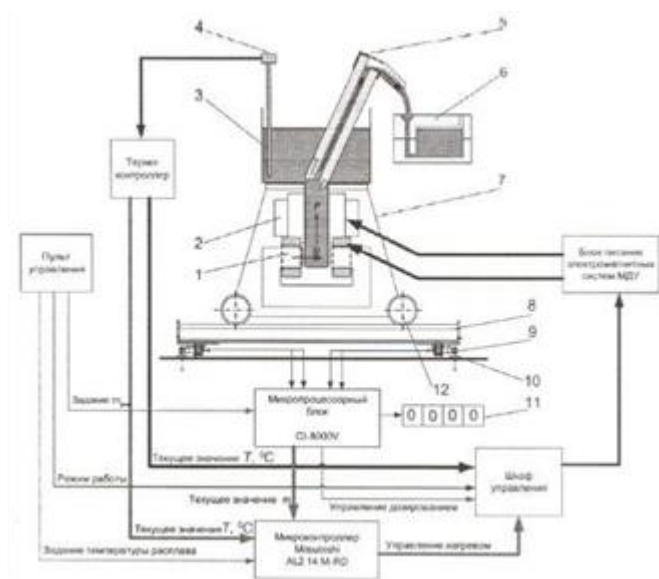
До зовнішніх дестабілізуючих чинників належать: коливання напруги живильної мережі і, як наслідок, коливання витрати розплаву, що надходить з МДН в ливарну форму; мережеві перешкоди різної частоти і амплітуди, які мають випадковий характер; систематичні або випадкові вібраційні і ударні збурення, діючі на силовимірювальну систему; електромагнітний впливу від працюючого обладнання, що знаходиться поблизу МДУ, а також інші можливі перешкоди невстановленого характеру [48, 49].

Внутрішні дестабілізуючі фактори обумовлені конструктивними особливостями МДУ, переважно впливають на стабільність витрати розплаву, що особливо небажано у вихідній фазі дозування. Важливим фактором, що впливає на точність дозування, є температура розплаву, від величини якої залежать його в'язкість, а, отже, і видаткові характеристики МДУ [49].

Структурно-функціональна схема дослідної магнітовагової установки приведена на рис. 3.3. В корпусі 7, забезпеченому двома колісними парами 12, розміщені індуктор 2, електромагніт 1, тигель 3 з металопровода, зливний жолоб 5. Корпус 7 з двома колісними парами 12 встановлений на рейках, закріплених на ваговій платформі 8, що спирається на чотири

силовим і регульовальним тензорезистор-ним датчиком 9 з консольними пружними елементами подвійного вигину.

Сумарне номінальне навантаження датчиків 9 становить 8 т. Датчики 9 закріплені на жорсткій підставці 10, в якій передбачена можливість



*Рис. 3.4. Структурно-функціональна схема магнітовагової установки для дискретного дозування і заливки розплаву алюмінію в ливарні форми.*

переміщення в горизонтальній площині по осі, перпендикулярній поздовжній осі, колісних пар 12 корпусу 7. Така конструкція магнітовагової установки забезпечує заливку розплаву при будь-якому розташуванні заливочного отвору ливарної форми 6 за рахунок переміщення установки в горизонтальній площині по двох координатах.

Виходи датчиків 9 через комутаційний блок (на схемі не показаний) підключені до мікропроцесорного блоку, виходи якого пов'язані з мікро, цифровим індикатором маси 11 і шафою керування, виходи якого підключені до блоку живлення електромагнітних систем МДУ (електромагніта 1 і індуктора 2). Контроль температури розплаву в тиглі 3 здійснюється за допомогою термопари 4, підключеної до термоконтролеру, виходи якого пов'язані з шафою керування. Виходи пульта управління підключені до мікропроцесорного блоку, мікроконтролеру і шафи керування [50, 51, 52, 53].

Процес дискретного дозування і заливки алюмінієвого розплаву в ливарну форму 6 відбувається так. У початковому стані тигель 3 магнітодинамічного насоса заповнений розплавом алюмінію, маса якого відображується на цифровому індикаторі 11. Температура розплаву в тиглі 3 вимірюється термопарою 4, вихідний сигнал якої надходить в термоконтролер, пов'язаний з мікроконтролером, що керує нагріванням розплаву до заданої температури шляхом регулювання струму індуктора 2. Це

дозволяє стабілізувати температуру розплаву в тиглі 3 при зміні маси розплаву в ньому від максимальної до мінімальної, що забезпечує сталість в'язкості розплаву в процесі дозування. За командою з пульта управління включається електромагніт 7, в робочій зоні насоса створюється електромагнітний тиск і розплав починає надходити по металопроводу 5 в ливарну форму 6 із заданою масовою витратою. При досягненні маси злитого розплаву в форму 6 з мікропроцесорного блоку надходить команда на зменшення витрати розплаву [53].

Реалізовано декілька режимів заливання з початковим та кінцевим гальмуванням швидкості заливання, які дають ряд технологічних переваг, проте метод через коливання витратних характеристик розплаву, непостійність залишкового зливу розплаву в кінці циклу заливки, та дозуванні порцій металу малої маси (яка може бути меншою ніж маса залишкового металу) в процесі заливки машини ЛПТ має обмежену застосовність.

Нами запропонований комбінований дозатор, що поєднує переваги пневматичних та магнітодинамічних пристроїв [56]. Він оснащений системою керування (рис. 3.3), яка функціонує наступним чином.

Напруга від шини "Пуск" поступає на перемикачі відповідно фаз напруги 19 і задатчиків режиму роботи регулятора 15. Перший перемикач підключає перемикач потужності 18 в режим "підняття металу", подаючи максимальну напругу на електромагніт 10. Регулятор 15 підключається до вимірювача тиску 3 в трубопроводі продувки 2.

На задатчику регулятора 15 встановлено значення тиску в режимі "наливання". Значення величини тиску, що виміряне датчиком 3, порівнюється із заданим. Так як фактичне значення тиску нижче заданого, регулятор 15 подає напругу через схему І 21 на ввімкнення блока пам'яті 22. Блок пам'яті, спрацьовуючи, включає впускний клапан 7, який створює тиск в ємності 8 і через редуктор 9 в трубопровід продувки 2. При цьому блокується включення схеми І 16. Рівень металу в трубопроводі 2 підвищується.



77

електромагніту з індуктором 10 перемикач 18 через блок пам'яті 22 вмикає впускний клапан 7.

По мірі закінчення розплаву тиск в трубопроводі продувки 2 падає і регулятор тиску 15 вмикає впускний клапан 7 по ланцюгу: регулятор 15 – схема І 21 – блок пам'яті 22 – впускний клапан 7. При досягненні розплавом зливного металопроводу 4 спрацьовує датчик наявності металу 1, що вмикає таймер 23, який налаштований на тривалість часу, яка визначається дозою металу. По закінченню заданого часу таймер 23 подає сигнал на перемикач фаз напруги 19, який перемикає блок 18 в режим роботи "опускання металу". При цьому на електромагніт з індуктором 10 подається максимальна напруга на опускання металу. В регуляторі 15 вмикається задатчик тиску, уставка якого відповідає режиму "збереження металу".

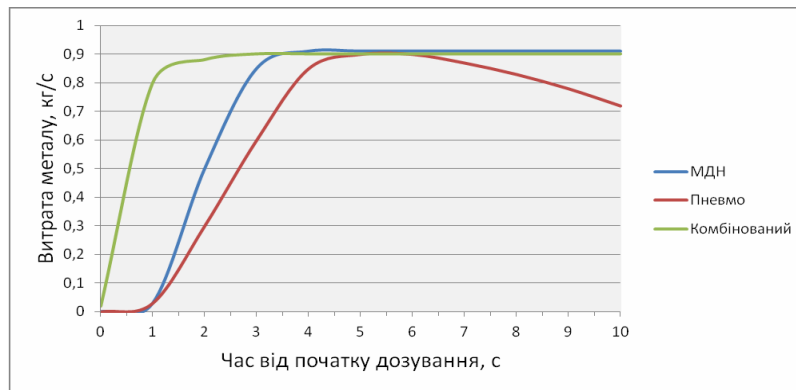
Так як виміряна величина тиску вище заданої, регулятор 15 подає напругу на ввімкнення схеми І 16 і далі блока пам'яті 17. Блок пам'яті 17 спрацьовує, вмикаючи випускний клапан 6, який, в свою чергу, через трубопровід 5 з'єднує ємність 8 з атмосферою і блокує ввімкнення схеми І 21. Рівень металу знижується.

Одночасно спрацьовує схема І 11, подаючи напругу на перемикач 18 для збільшення напруги рівня металу блоком 10. Перемикач потужності 18 не змінює вихідної напруги, так як вона встановлена на максимальному значенні. При досягненні тиску, відповідного заданому, спрацьовує схема І 12, подаючи напругу на перемикач 18 на зниження напруги магнітодинамічного зниження металу. При повному вимкненні вихідної напруги з блоку 10 перемикач потужності 18 через блок пам'яті 17 виключає випускний клапан 6. Рівень металу в ємності 8 при цьому встановлюється на значенні, яке визначається задатчиком в регуляторі 15.

Подальше удосконалення описаного дозатора відбувалося в напрямку запобігання викидів при ввімкненні електромагніту з індуктором при малій масі металу в ємності.

Проведено порівняння витратних характеристик різних дозаторів. На рис.3.5. показано зміну витратних характеристик МДН, пневматичного

дозатора, та запропонованого комбінованого пристрою.



*Рис.3.5. Характер зміни витратних характеристик різних дозаторів з часом дозування*

Можна зробити висновок, що метод комбінованого дозування дає змогу в певній мірі подолати недоліки окремих способів дозування, вирівняти витрату металу з часом та починати дозування фактично без початкової затримки.

При високих вимогах до маси металу, що дозується, пристрої можуть працювати в комплекті з мірними ємкостями чи з поворотними жолобами. Проте при будь-якому зі способів дозування розплаву в системі був відсутній зворотний зв'язок, тому в якості зворотного зв'язку було обрано контроль висоти прес-залишку, тому що ця величина не залежить від перерізу каналу заливання, часу, а лише від номінальної кількості залитого металу.

Запропоновано технічне рішення, яке дозволяє в якості мірної ємкості використовувати прес-камеру машини ЛПТ [58]. Винайдений пристрій визначає дозу металу в прес-стакані в момент різкого гальмування прес-поршня при заповненні металом всього перерізу ємкості. На контрольовану величину дози металу не впливають порушення процесу заповнення прес-форми

(недоливи, вихід металу із роз'ємна прес-форми), що сприяє підвищенню точності дозування.

Пристрій (рис. 3.6.) працює наступним чином.

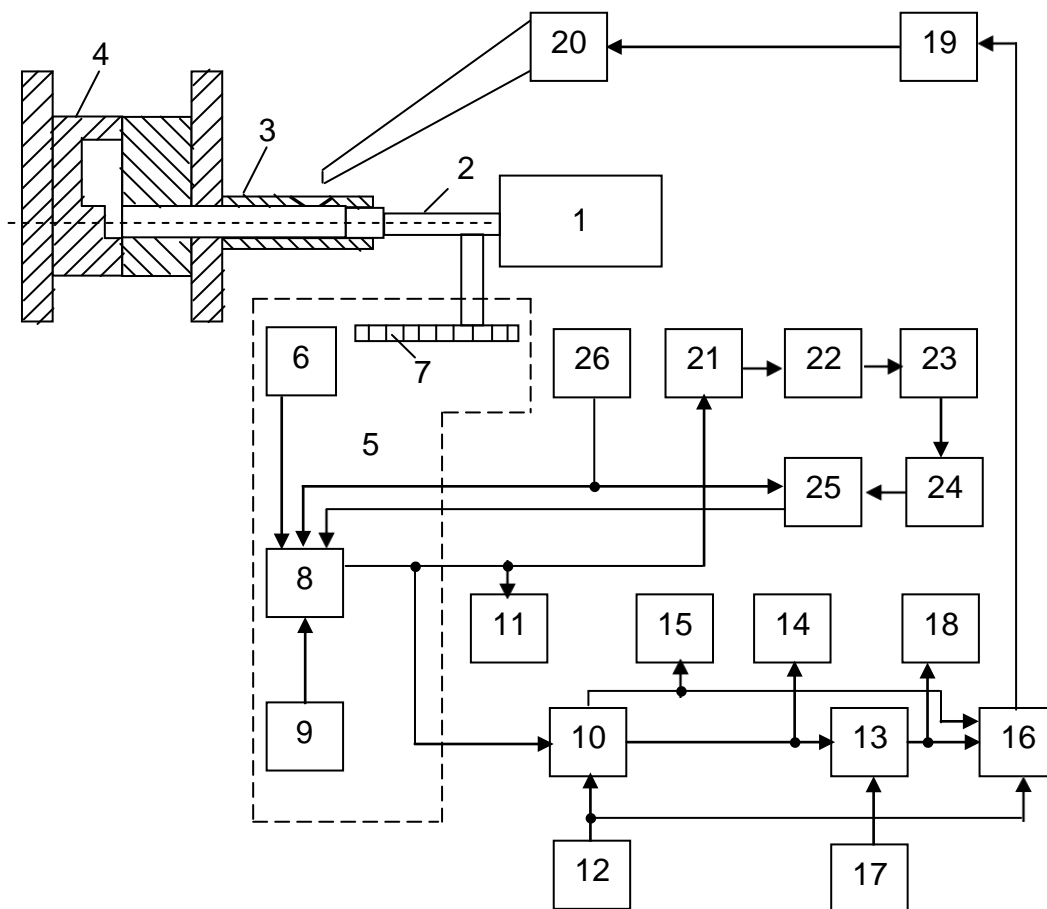


Рис. 3.6. Структурна схема пристрою вимірювання та корекції дози металу.

Перед початком пресування датчик вихідного положення прес-поршня 4 видає сигнали "Сброс" в блок пам'яті 9 і "Запис" в лічильник 8, в якому записується число, встановлене на задатчику максимальної дози металу 7, що відповідає положенню прес-поршня 3, при якому рейка 6 входить в взаємодію з датчиком імпульсів 5.

Поки метал не заповнить весь переріз прес-стакана 1, опір прес-поршня 3 невеликий і його швидкість зростає, досягаючи деякої величини. Прискорення з яким рухається прес-поршень, або додатне, або дорівнює нулю. При заповненні металом всього внутрішнього перерізу прес-стакана опір руху прес-поршня 3 різко збільшується, так як метал витісняється через вузький переріз



живильника, швидкість прес-поршня різко падає, а прискорення стає від'ємним.

Так як сигнали, що знімаються з виходів ЦАП 15 та диференціаторів 11 і 12 відповідають шляху, швидкості та прискоренню прес-поршня 3, то в момент повного заповнення металом перерізу прес-стакана 1 на вході порогового елемента 13 з'являється додатна напруга (зменшення показів лічильника 8 відповідає збільшенню шляху прес-поршня 3). При цьому в блок пам'яті 9 вноситься одиничний сигнал, який, поступаючи на режимний вхід лічильника 8, забороняє вхід імпульсів.

Таким чином, число, зафіксоване в лічильнику 8, дорівнює різниці чисел, відповідних максимальній дозі й шляху пройденому прес-поршнем 3 до повного заповнення металом перерізу прес-стакана 1. Це число відповідає істинній дозі металу в прес-стакані 1, що запресовується в прес-форму. В суматорі 17 число порівнюється зі значенням номінальної дози, що задається задатчиком 16. Різниця показів, які відповідають відхиленню дози і заданому значенню відхилень, ініціює на вході суматора 18 сигнал, що відповідає величині виходу відхилення за допуск.

Цей сигнал подається на вхід суматора 14, куди також подається число зі задатчика величини номінальної дози 16. На виході суматора 14 з'являється число, що відповідає заданій черговій дозі металу з урахуванням корекції. Знак "+" або "-" залежить від знаку величини відхилення запресованої дози від номінальної. Сигнал відповідного знаку подається зі знакового виходу суматора 17 на вхід суматора 14. Вихід суматора 14 підключений до входу блока керування дозатором 10, в якому завдання скорегованої дози металу при черговій запресовці перетворюється в часовий проміжок при постійному надлишковому тиску (напрузі) в дозаторі або в значенні тиску (напруги) при постійному часі дозування. Блок керування дозатором 10 регулює величину дози металу, подаючи команду на дозатор 2.

При роботі машини без дозатора та ручному дозуванні металу через функцію об'єму (розливочним ковшом, в ручну оператором-ливарником) отримано наступні дані:

Табл. 3.2. Дані по заливанню металу без автоматизації

№ заливки	Маса деталі, кг	Номінальна вага деталі, кг	Номінальна вага виливка, кг	Примітка
1	0,325	0,286	0,52	недолив
2	--/--	0,316	0,515	недолив
3		0,33	0,515	Газова раковина
4		0,328	0,51	
5		0,33	0,515	
6		0,33	0,505	Повернення, тріщина
7		0,338	0,505	
8		0,34	0,5	
9		0,33	0,5	
10		0,329	0,485	
11		0,335	0,495	
12		0,324	0,48	Недолив, повернення
13		0,333	0,485	
14		0,327	0,49	
15		0,325	0,475	
16		0,327	0,48	
17		0,33	0,465	Газова раковина
18		0,338	0,465	
19		0,336	0,46	
20		0,332	0,465	
21		0,335	0,455	Тріщина
22		0,331	0,45	Тріщина
23		0,33	0,455	
24		0,326	0,455	
25		0,333	0,445	
26		0,33	0,44	Газова раковина
27		0,33	0,435	
28		0,328	0,44	
29		0,326	0,44	
30		0,329	0,44	

Графічна залежність буде мати наступний вигляд, та свідчить про зменшення точності дозування в залежності від номеру циклу в сторону зменшення через наморозжування металу на стінки ковша та зменшення його рівня в плавильній ємності.

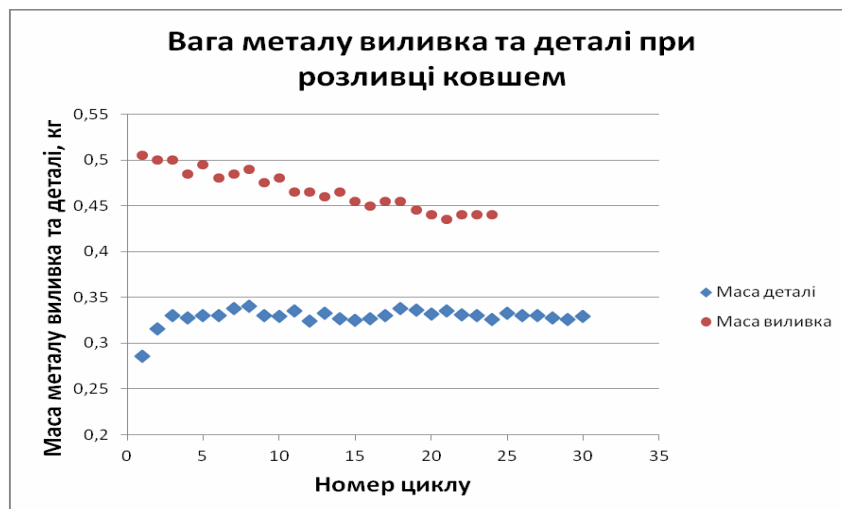


Рис.3.7. Маса виливка за номером циклу.

При застосуванні комбінованого дозатора та контролю і коректуванню величини порції металу за величиною прес-залишку вдалося зменшити діапазон зміни маси виливка, тобто стабілізувати порцію металу, що заливається.

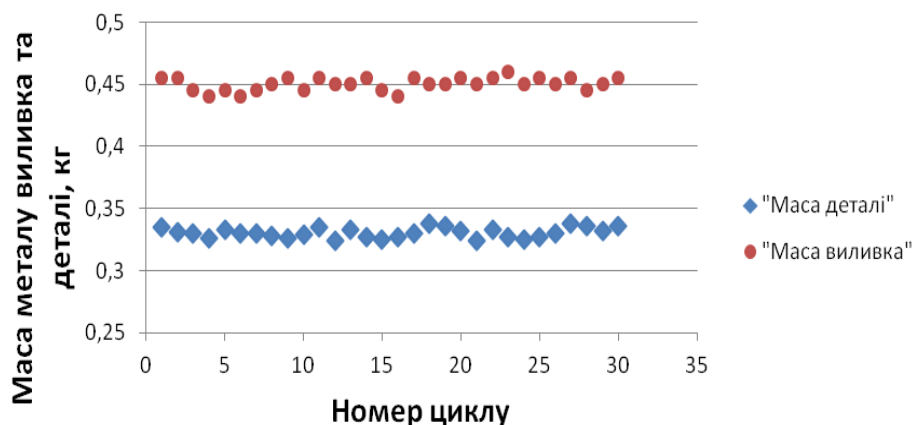


Рис 3.8. Маса деталі при комбінованому дозуванні.

Отримані дані свідчать про більш стабільне дозування при використанні комбінованого дозатора, зменшується та стабілізується величина прес-залишку, зменшується кількість металу, що повторно переплавляється.

Використання пристрою дозволяє збільшити вихід придатного на 0,5 % за рахунок зниження маси прес-залишка.

### 3.3. Система керування температурними параметрами процесу

Температурні параметри процесу ЛПТ умовно можна розділити на процеси, які протікають у плавильному агрегаті, та безпосередньо в прес-формі. До факторів, що впливають на температуру металу можна віднести характеристики печі, втрати тепла металом при його транспортуванні до заливного вікна, охолодження рідкого металу, а потім і затверднувшого виливка в порожнині прес-форми, та ін. Розглянемо детальніше ці процеси.

#### 3.3.1. Температурний режим ванни плавильної печі

Температура металу, що поступає в камеру пресування машини лиття під тиском (ЛПТ), є важливим параметром технологічного процесу. Він впливає на всі технологічні операції: режим змащування прес-форми, тепловий,

запресовку, підпресовку, час витримки готової відливки в прес-формі. Уважно слідкувати за температурним режимом плавки змушує і те, що навіть незначне підвищення температури (на 20...40 °С) в порівнянні з допустимою для даного матеріалу тигля різко зменшує термін служби останнього.

Відома ціла низка різноманітних методів контролю температури печі [58]. Разові заміри температури в агрегаті термопарами занурення є домінуючим методом контролю температури [59]. Але такі методи мають відносно високу вартість в умовах нагріву металу в тигельних агрегатах.

Дослідження проводились на індукційній тигельній печі (ІТП) при переплавці алюмінієвих сплавів. Для виробництва виливків на машинах лиття під тиском використовують найчастіше алюмінієві сплави, проте технологія також показує досить непогані результати як для легких сплавів на основі магнію так і для мідних сплавів, зокрема латуней. Розрахунки в цьому випадку мають корегуватись залежно від характеристик сплаву (густини, температури плавлення, коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності та ін.), з якого безпосередньо виготовляються деталі.

При відсутності безперервного інструментального контролю температури металу в печі для отримання якісних виливків, виникає необхідність прогнозування температурного режиму об'єкта за математичною моделлю, що враховує як тепловий стан ванни, так і втрати теплоти на нагрів футерівки.

За витратами енергії на теплову обробку алюмінієвої заправки процес відноситься до енергоємних, що зумовлюється високими значеннями теплоємності й теплоти плавлення робочого тіла. Найбільш енергоємним являється етап розплавлення, на долю якого приходить 50 % енерговитрат.

По ходу плавки, що має циклічний характер, змінюються температура, склад і гідродинамічні параметри рідкої фази. Складність теоретичного аналізу теплообміну системи ванна-загрузка обумовлюється взаємозв'язком масо- і теплообміну на границі фазового перетворення.

В розробці механізму плавлення твердого тіла і створенні схем розрахунку велику роль відіграють роботи Е.М. Гольдфарба [60], М.А. Глинкова [61], Д.А. Гітгарца [62] та інших авторів.

Процес плавлення твердого тіла в ванні розплаву можна розділити на три адитивних періоди, що слідують один за одним. Перший – тепловий, характеризується прогрівом шихти при інтенсивному поглинанні теплоти розплаву. Другий – дифузійний, що враховує комплексний масо-теплопереніс. При розігріванні рідкої фази до температури, що перевищує температуру плавлення твердої загрузи, починається третій період – інтенсивного плавлення і перегріву, характерний тим, що частини загрузки добре прогріті й градієнт температури по їх перерізу близький до нуля.

Точні методи виявляються малоефективними для багатьох практичних задач, так як їх застосування пов'язане громіздкими розрахунками, досить складними для програмування. Числові методи також громіздкі й незручні для аналізу й інженерних розрахунків.

Процес теплової обробки металошихти в ванні ІТП, лімітуюча ланка якого – зовнішній теплообмін, протікає при початкових умовах, що враховують температуру загрузки і розплаву, їх масу, насипну щільність загрузки, яка забезпечує ефективну поверхню контакту з розплавом на границі розділу фаз, теплофізичні характеристики робочих тіл, питому потужність печі й т.д.

Для спрощення задачі теплофізичні властивості робочих тіл, що беруть участь в теплообміні, приймаємо постійними при середній інтегральній температурі по об'єму. Вважаємо, що внаслідок високої теплопровідності твердого алюмінію процес його плавлення в ванні, що барботується практично проходить без ефекту намерзання, так як загрузка швидко прогрівається по об'єму за рахунок інтенсивної теплоти, що підводиться.

Так як нагрів, плавлення і перегрів твердої загрузи в ІТП відбувається за рахунок тепловіддачі від рідкого металу, необхідною умовою нормальної експлуатації агрегату являється робота з неповним зливом, тобто з залишком рідкого металу (ЗРМ) в тиглі, що складає 60...70 % від садки. Процес теплової обробки загрузи відбувається з використанням ентальпії перегріву ЗРМ і частково теплоти плавлення металу згідно балансу

$$\beta(\varphi)m[c(t_l - t_n) + \vartheta] = m_0[c_p(t_{к.р.} - t_l) + \mu\vartheta], \quad (3.18)$$

де  $\beta(\varphi)$  – масова частка твердої металошихти  $\varphi$  – го виду, що розплавляється в момент завантаження у ванну;

$m, m_0$  – маса загрузки і ЗРМ, кг;

$c, c_p$  – середня питома теплоємність твердого і рідкого металу, Дж/(кг·К);

$t_l, t_{к.р.}$  – температура ліквідуса загрузки середнього хімічного складу і кінцева температура рідкого металу, °С;

$t_{п}$  – середня початкова температура шихти в момент її завантаження у ванну, °С;

$\vartheta$  – питома теплота плавлення металу, Дж/кг;

$\mu$  – масова доля ЗРМ, що віддає теплоту плавлення на обробку загрузки.

На практиці процес в ІТП можливий при неповній кристалізації ЗРМ  $\mu < 0,25$  [63, 64].

Величина

$$\mu = \frac{\beta(\varphi)m[c(t_l - t_{п}) + \vartheta] - m_0c_p(t_{к.р.} - t_l)}{m_0\vartheta}, \quad (3.19)$$

для найбільш несприятливого випадку загрузки (стружка) складає  $\mu = 0,19$ .

У ванні, що рухається поступально переніс речовини визначається силою інерції (збереженням імпульсу) або зміною кількості руху – рівнянням, яке в інтегральній формі для гідродинамічно «тонкого» (з постійною по модулю швидкістю середовища в його об'ємі) тіла має вигляд

$$I = m_0 w = P_{п}/g, \quad (3.20)$$

де  $I$  – імпульс маси, що рухається, кг·м/с;

$P_{п}$  – потужність, що витрачається на електродинамічне перемішування ванни, Вт;

$g = 9,81$  – прискорення сили земного тяжіння, м/с<sup>2</sup>.

Використовуючи данні з [58] і вважаючи, що 10 % корисної потужності витрачається на електродинамічне перемішування ванни, розрахункова швидкість циркуляції рідкого металу в робочому просторі, наприклад, 1-тонної ІТП промислової частоти типу ІАТ-1/0,4 МЗ, що працює з неповним (40 %) зливом рідкого металу, складає 1,35 м/с. Результат розрахунку погоджується з даними (1 м/с), приведеними в роботі [65].

При  $Re = w\bar{D}/\nu_p = 1,35 \cdot 0,75 / (0,458 \cdot 10^{-6}) = 2,21 \cdot 10^6 > Re_{кр}$  встановлюється розвинений турбулентний режим течії. Тут  $Re$  – критерій Рейнольдса, що визначає гідродинамічний характер руху середовища;  $\bar{D} = 0,75$  – середній внутрішній діаметр футерівки печі, м;  $\nu_p = 0,458 \cdot 10^{-6}$  ( $0,41 \cdot 10^{-6}$  – для латуні) – кінематична в'язкість ванни,  $m^2/c$ ;  $Re_{кр} = 10^4$  – критичне значення критерію Рейнольдса.

Процес теплообміну в ванні в своїй основі має гідродинамічну природу, так як барботування ванни зумовлює інтенсивний теплообмін рідкої фази з поверхнею твердого тіла, що омивається.

В процесі плавки в ІТП між ванною рідкого металу та твердими тілами (загрузка, футерівка тигля) відбувається теплообмін при граничних умовах третього роду на вогневій поверхні. Перенос теплоти в тверде тіло в загальному вигляді можна описати рівнянням

$$\alpha(t_p - t|_{x=0}) = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (3.21)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від ванни до твердого тіла,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;

$t_p$  – поточна температура рідкого металу,  $^{\circ}C$ ;

$t|_{x=0}$  – температура теплосприймючої поверхні твердого тіла,  $^{\circ}C$ ;

$\lambda$  – теплопровідність твердого тіла,  $Вт/(m \cdot K)$ ;

$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0}$  – градієнт температури на границі розділу фаз,  $K/m$ ;

$x$  – перпендикулярна до поверхні просторова координата твердого тіла, початок якої співпадає з границею розділу фаз, м.

На основі реальних даних після нескладних перетворень отримуємо

$$t_p - t|_{x=0} = \lim_{\frac{\lambda}{\alpha} \rightarrow 0} \left( -\frac{\lambda}{\alpha} \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} \right) = 0 \quad (3.22)$$

тобто температура сприймаючої поверхні твердого тіла по ходу плавки прагне до температури металу. Отже, гранична умова третього роду перетворюється в більш просту граничну умову першого роду.

Основний режимний параметр системи – вимушена швидкість зміщення частинок робочого тіла. Згідно теорії турбулентності Л.Д. Ландау руху суцільного середовища в автономній області сприяють монотонна і пульсуюча складові швидкості потоку [66], які відповідальні за вимушені коливання параметрів. Співвідношення цих компонентів швидкості зумовлює масштаб розвитку утворення хвиль в робочому тілі [67].

В режимі вимушених коливань ванна ІТП поводить себе як лінійний осцилятор (резонатор Гельмгольца), який генерує теоретично нескінченно великий спектр гармонік. Рухаючись вздовж лінії потоку, частинки ванни на фоні монотонної зміни швидкості викликають вимушені затухаючі коливання останньої з нескінченним спектром зростаючих частот і відповідно амплітуд, що зменшуються. Проте, як показує аналіз частотних властивостей об'єкту в припущеннях, що прийняті в технічній теорії коливань, металева ванна як важка та в'язка рідина, пропускаючи частоту основного струму через дисипативний ефект є інтенсивним фільтром подальших частот головних гармонік параметру, що коливається, без практичного виявлення гармонічної реакції.

Найбільш представницький в метрологічному плані основний тон, якому відповідає коливання з найнижчою частотою першої головної гармоніки й який вміщує майже всю енергію пульсуючого руху. Амплітуду основного тону вимушених коливань визначаємо за її часткою (відносній амплітуді) від відповідного значення монотонної складової. Цю частку знаходимо за даними досліджень С.С. Кутателадзе і В.Є. Накорякова як функцію гідродинамічного режиму, що залежить від конвективного члену  $w$  – повздовжнього компоненту швидкості потоку крапельної рідини в вертикальній трубі. Для випадку розвиненої турбулентності середня за перерізом труби відносна амплітуда (мірапульсацій) складає  $\varepsilon = w_1/w = 0,8$ , де  $w_1$  – амплітуда першої головної гармоніки швидкості потоку, м/с.

Потужність хвильового процесу ванни визначається виразом

$$P_{\text{т.п.}} = 0,5 \xi_1^2 \omega_1^2 w_A F \rho_p, \quad (3.23)$$



де  $P_{\text{т.п.}}$  – потужність турбулентних пульсацій, Вт;

$\xi = w_1/\omega_1$  – амплітуда осцилюючого зміщення частинок ванни, м;

$\omega_1$  – кругова частота коливань першої головної гармоніки швидкості ванни, рад/с;

$w_\Lambda = \Lambda_1 \omega_1 / (2\pi)$  – швидкість поширення хвилі першої головної гармоніки швидкості ванни, м/с;

$\Lambda_1 = 2\pi w_1 / \omega_1$  – довжина хвилі першої головної гармоніки швидкості ванни, м;

$F = \pi w_1^3 \bar{D}^2 \rho_p / 4$  – площа поверхні горизонтального перерізу агрегату як хвилеводу, м<sup>2</sup>;

$\rho_p$  – густина ванни, кг/м<sup>3</sup>.

З урахуванням приведених співвідношень остаточно отримуємо

$$P_{\text{т.п.}} = \pi w_1^3 \bar{D}^2 \rho_p / 8. \quad (3.24)$$

Використовуючи експериментальні дані й співвідношення теорії подібності, на основі фізичного моделювання знайшли загальний вигляд рішення без інтегрування диференціальних рівнянь. Отримано критеріальне рівняння теплопереносу при розвинутій турбулентності потоку для внутрішньої задачі в круговому циліндрі (формула Краусольда) з гідродинамічною поправкою, яка викликана осциляцією рідини, що рухається

$$St = 10^{-7} [\text{Re}(1 + \varepsilon)]^{0.8} \text{Pr}^{0.35}, \quad (3.25)$$

де  $St = \lambda_p H / (c_p \rho_p w_p)$  – теплообмінний критерій Стентона;

$\lambda_p$  – теплопровідність рідкого металу, Вт/(м·К);

$H = \alpha / \lambda_p$  – відносний коефіцієнт теплообміну в ванні, м<sup>-1</sup>;

$\text{Pr} = \nu_p / a_p$  – теплообмінний критерій Прандтля;

$a_p = \lambda_p / (c_p \rho_p)$  – температуропровідність рідкого металу, м<sup>2</sup>/с.

З (3.25) визначено числове значення коефіцієнту теплопереносу в ванні з урахуванням теплофізичних даних  $\lambda_p = 100$  Вт/(м·К) ( $\lambda_p = 107$  Вт/(м·К) – для латуні),  $c_p = 1050$  Дж/(кг·К) ( $c_p = 416$  Дж/(кг·К) для латуні) і  $\rho_p = 2400$  кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_p = 8300$  кг/м<sup>3</sup>) [3.20]:  $\alpha = 9050$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), який збігається з даними І.А. Партіна та ін., що досліджували на вогняній моделі тепловіддачу від рідкого алюмінію до твердого тіла при різних режимах омивання [68].

Коливання ванни знижують опір переносу теплоти. Розрахунок показує, що додатний вклад в процес теплопереносу в ванні від гідродинамічного осцилюючого ефекту складає 6,2 %, що дає можливість збільшити на 1,6 % масову долю твердої загрузки, що переробляється.

Вважаємо, що внаслідок інтенсивного перемішування рідкого металу електромагнітним полем температура розплаву в тиглі по всьому об'єму однакова. При цьому у ванні, як в робочому тілі ідеального змішувача, можна знехтувати перепадом масового вмісту компонентів і температури по об'єму і розглядати процеси для випадку фізично «тонкого» (нульмірного) об'єкта, що дозволяє виключити з його опису геометричні координати. Таким чином, маємо квазігомогенний, просторово ізотропний об'єкт із зосередженими параметрами.

Кінетика процесу обробки твердої загрузки в ІТП визначається її охолоджувальним впливом. На основі спрощуючих припущень, зведений розв'язок на основі співвідношень термічно «тонкого» тіла без виділення границь фазового переходу, створений математичний опис процесу теплової обробки твердої загрузки у ванні ІТП, що барботується. Рівняння теплообміну між ванною та поверхнею шматків можна записати наступним чином:

$$\lambda_p HF(t_{\text{кр.}} - t) = \frac{1}{60} mc_y \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (3.26)$$

де  $F$  – площа поверхні шматків шихти, що омивається металом, м<sup>2</sup>;

$t$  – середня по товщині шматків поточна температура шихти, °С;

$c_y$  – умовна середня питома теплоємність алюмінієвого сплаву, Дж/(кг·К), яка визначається з урахуванням твердої та рідкої фаз, а також теплоти плавлення

$$c_y = c \frac{t_l - t_{\text{п}}}{t_l} + \frac{q}{t_l} + c_p, \quad (3.27)$$

$\tau$  – поточний час, що відрховується від початку плавки, хв.

З урахуванням теплофізичних даних після підстановки конкретних значень знаходимо  $c_y = 2240$  Дж/(кг·К) ( $c_y = 764$  Дж/(кг·К) – для латуні).

Перетворенням виразу (3.26) отримуємо звичайне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами

$$\frac{mc_y}{60\lambda_p HF} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} + t = t_{к.р}, \quad (3.28)$$

яке характеризує процес динаміки нагріву, розплавлення та перегріву загрузки з інерційним запізненням, хв.

$$\Delta\tau = mc_y / 60\lambda_p HF, \quad (3.29)$$

що називається сталою часу перехідного процесу.

Вважаємо, що площа поверхні шматків загрузки обернено пропорційна її насипній щільності. Тоді згідно рівняння (3.29) можна записати

$$\Delta\tau(\varphi) = mc_y \rho(\varphi) / 60\lambda_p Hk, \quad (3.30)$$

де  $\Delta\tau(\varphi)$  – стала часу перехідного процесу проплавлення загрузки  $\varphi$ -го вигляду, хв.;

$\rho(\varphi)$  – насипна щільність загрузки  $\varphi$ -го вигляду, кг/м<sup>3</sup>;

$k$  – коефіцієнт пропорційності, кг/м.

Розв'язок рівняння (3.28) виражається асиметричною функцією

$$t = t_{к.р} \{1 - \exp[-\tau/\Delta\tau(\varphi)]\}, \quad (3.31)$$

Повний час інерції перехідного процесу рівняння (3.31), що описується інерційною ланкою першого порядку, або тривалість теплової обробки загрузки  $\varphi$ -го вигляду в ванні ІТП  $\Delta\tau_{пл}(\varphi)$ , хв, визначається за відомим співвідношенням

$$\Delta\tau_{пл}(\varphi) \approx 3\Delta\tau(\varphi) \quad (3.32)$$

Теплота на нагрів і розплавлення шихти споживається не миттєво, а із запізненням, що обумовлене такою ж інерційною ланкою, як в рівнянні (3.31). Отже, рівняння перехідного процесу для питомого теплового потоку  $q$ , Вт/кг

$$q = q|_{\tau=0}(\varphi) \exp[-\tau/\Delta\tau(\varphi)], \quad (3.33)$$

де  $q|_{\tau=0}(\varphi)$  – питома потужність, що витрачена на процес теплової обробки загрузки  $\varphi$ -го вигляду в момент  $\tau = 0$ , Вт/кг.

Для визначення значення  $q|_{\tau=0}(\varphi)$  використовуємо співвідношення матеріально-теплового балансу при обробці загрузки  $\varphi$ -го вигляду в ванні печі

$$Q[1 - \beta(\varphi)] = 60q|_{\tau=0}(\varphi) \int_0^{3\Delta\tau(\varphi)} \exp[-\tau/\Delta\tau(\varphi)] d\tau, \quad (3.34)$$

де  $Q$  – питома теплота, витрачена на нагрів, розплавлення та перегрів загрузки, Дж/кг, визначається за формулою

$$Q = c(t_l - t_n) + \vartheta + c_p(t_{к.р} - t_l). \quad (3.35)$$

При охолодженні плавки загрузкою середнього хімічного складу  $Q = 880 \cdot 10^3$  Дж/кг.

Нагрів, розплавлення та перегрів загрузки протікають у ванні практично одночасно. Середню тривалість кожної операції можна визначити як часткове від ділення розрахункового енергоспоживання (ентальпії) у відповідній операції на середнє значення існуючої потужності.

Дана модель при урахуванні ефектів термохімічних реакцій в формулах (3.27) і (3.35) може бути використана також для опису процесу засвоєння хімічної активності загрузки.

Функція  $f(\varphi)$ ,  $^0\text{C}$ , що визначається процесом теплової обробки загрузки  $\varphi$ -го вигляду у ванні, може бути записана

$$f(\varphi) = -\Delta t(\varphi) - \int_0^{3\Delta t(\varphi)} \frac{\partial t}{\partial \tau}(\varphi) dt, \quad (3.36)$$

де  $\Delta t(\varphi)$  – зниження температури ванни внаслідок розплавлення металошихти  $\varphi$ -го вигляду в момент завантаження в піч,  $^0\text{C}$ ;

$\frac{\partial t}{\partial \tau}(\varphi)$  – швидкість зміни температури ванни, що викликана проплавленням загрузки  $\varphi$ -го вигляду по ходу плавки,  $^0\text{C/хв}$ .

Використовуючи співвідношення матеріально-теплового балансу плавки, виразимо функцію  $f(\varphi)$  в наступному вигляді:

$$f(\varphi) = -\frac{\omega l}{Q} \left[ Q\beta(\varphi) + 60q|_{\tau=0}(\varphi) \int_0^{3\Delta t(\varphi)} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta t(\varphi)}\right) d\tau \right] \quad (3.37)$$

де  $\omega$  – питомий охолоджуючий ефект твердої загрузки,  $^0\text{C}/\%$ ;

$l$  – відносна витрата загрузки, %.

Інтегруючи рівняння (3.37) з урахуванням початкових умов і теплового балансу плавки, отримуємо вираз кінетики перехідного процесу від температурного збурення ванни ІТП внаслідок теплової обробки металошихти

$$t = -t_p \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\tau}{\Delta\tau(\varphi)[1 - \beta(\varphi)]m} \right) \right] \quad (3.38)$$

де  $t_p = \frac{Q[1 - \beta(\varphi)]m}{0,95c_p m_0}$  – значення температури продуктів теплової обробки

металошихти, що встановилося,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$$0,95 - \text{значення визначеного інтегралу } \frac{1}{\Delta\tau(\varphi)} \int_0^{3\Delta\tau(\varphi)} \exp \left( - \frac{\tau}{\Delta\tau(\varphi)} \right) d\tau$$

$$\Delta\tau_y(\varphi) = \frac{c_y \rho(\varphi)}{60\lambda_p Hk} - \text{питоме значення сталої часу перехідного процесу хв/кг.}$$

Результати розрахунку індукційної плавки металу (рис. 3.5) отримані при  $l = 40\%$ ;  $t_n = 250^{\circ}\text{C}$ ;  $t_l = 658^{\circ}\text{C}$  ( $t_l = 920^{\circ}\text{C}$  – для латуні);  $t_{к,р} = 750^{\circ}\text{C}$  ( $t_{к,р} = 1000^{\circ}\text{C}$ ) і  $k = 93$  кг/м, а також при параметрах, що залежать від виду загрузки (табл. 3.3).

Табл. 3.3. Значення параметрів плавки, що залежать від виду загрузки

Вид загрузки $\varphi$	$\rho(\varphi)$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta(\varphi)$	$\Delta\tau_y(\varphi)$ , хв./кг	$\Delta\tau(\varphi)$ , хв.	$\Delta\tau_{пл}(\varphi)$ , хв.
Легка (стружка)	300	0,33	0,0133	5,32	16,0
Середня (ливники)	600	0,20	0,0266	10,65	32
Вагова (чушки)	1300	0,10	0,0576	23,05	69,2

\* при розрахунках для мідних сплавів необхідно робити коректування вхідних параметрів, які залежать від властивостей матеріалу.

Як видно з рис. 3.5, при одній і тій самій загрузці середня швидкість теплової обробки алюмінію зменшується зі збільшенням його насипної щільності приблизно в 2 рази при послідовному переході з одного виду загрузки на іншу (20, 10 і  $5^{\circ}\text{C/хв.}$ ). При верхньому обмеженні питомої корисної

потужності ІТП до 200 Вт/кг в початковий період (20 – 25 % тривалості плавки) загрузка обробляється в основному теплотою, що акумульована ЗРМ.

Дані узгоджуються з результатами розв'язку нелінійної задачі теплової обробки загрузки, що представлена в формі гіпотетичних куль.

На основі створеного математичного опису теплової обробки загрузки в ІТП розроблено алгоритм прогнозування температури металу в рамках АСКТП плавки, який показав високу збіжність з експериментальними даними і забезпечив точність отримання розплаву заданої температури не нижче 1 %. Стандартне відхилення температури металу зменшилось на 4,7 °С, що

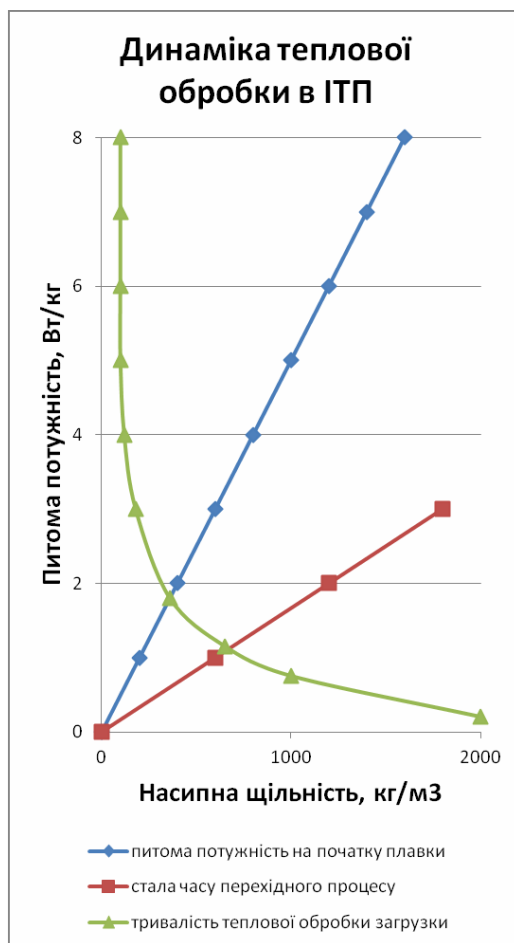


Рисунок 3.9. Розрахункові залежності, що характеризують динаміку теплової обробки в ІТП алюмінію різної напісної щільності.

дозволило значно покращити якість керування і ТЕП процесу. Показані залежності в повній мірі характеризують процес нагріву та розплавлення металу, методи розрахунків можуть бути використані не тільки для вказаних алюмінієвих сплавів, а як універсальний метод для мідних сплавів також.

Нагрівання металу в дозаторі проводиться індукторами (рис. 3.3, 3.4, 3.5). Ступінь нагріву змінюється силою електричного струму в нагрівальній печі, який ступінчасто керується тиристорним трьохфазним регулятором напруги за допомогою сухих контактів по схемі трипозиційного регулятора з зоною нечутливості  $\pm 10$  °С. В ланцюжку керування тиристором підключаються чи закорочуються два резистори, в результаті чого забезпечується три ступеня регулювання: нагрів відсутній (обидва

резистори підключені), слабкий нагрів (закорочений один резистор) і повний (закорочені обидва резистора).

Більш складний алгоритм керування температурою металу в дозаторі реалізовано мікроконтроллером в якості регулятора (табл. 3.2).

Алгоритм керування передбачає наступні функції: зчитування і запам'ятовування значення температури; порівняння виміряного значення з заданим, а також з мінімально та максимально можливим значенням; видачу сигналу на вимкнення електронагрівачів печі за температури металу, що перевищує максимальну або задану в проміжку встановленого перепаду для наступного нагріву теплою, що виділяється при охолодженні нагрівачів; видачу сигналу на ввімкнення одного ступеню нагріву печі при температурі металу вище заданої, але в межах встановленого перепаду і тенденції до подальшого нагріву; видачу сигналу на ввімкнення одного ступеню нагріву при температурі металу нижче заданої, але в межах встановленого перепаду і тенденції до подальшого охолодження; видачу сигналу на ввімкнення обох ступенів нагріву при температурі металу нижче встановленого перепаду.

Табл. 3.4. Алгоритм керування температурою металу в дозаторі.

Температурний діапазон	Значення температури металу, з урахуванням		Ступінь нагріву	
	попереднього виміру $t_1$	поточного виміру $t_2$	Слабка	Повна
$t_2 \geq t_{\text{макс}}$				
$t_2 \leq t_{\text{мін}}$			+	+
$t_{\text{макс}} > t_2 > t_3$		$t_2 - t_3 \geq \Delta t_1$		
$t_{\text{макс}} > t_2 > t_3$	$t_2 - t_1 \geq \Delta t_2$	$t_2 - t_3 < \Delta t_1$		
$t_{\text{макс}} > t_2 > t_3$	$t_2 - t_1 < \Delta t_2$	$t_2 - t_3 < \Delta t_1$	+	
$t_3 \geq t_2 > t_{\text{мін}}$	$t_2 - t_1 \geq \Delta t_2$	$t_3 - t_2 \leq \Delta t_1$		
$t_3 \geq t_2 > t_{\text{мін}}$	$t_2 - t_1 < \Delta t_2$	$t_3 - t_2 \leq \Delta t_1$	+	
$t_3 \geq t_2 > t_{\text{мін}}$		$t_2 - t_3 \leq \Delta t_1$	+	+

В табл. 3.4:  $t_{\min}$ ,  $t_{\max}$  – відповідно мінімально та максимально допустимі температури металу в дозаторі,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  – значення заданої і двох послідовних замірів температури металу відповідно,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  – уставки відхилення температури металу від заданої та перепаду температури металу по часу відповідно; відсутність позначок в графах «Ступінь нагріву» означає відсутність останнього.

### 3.3.2. Система регулювання температури прес-форми.

Отримання виливків в машинах ЛПТ – процес з циклічним режимом роботи (підготовка прес-форми, заливка металу, запресовка і формування відливки). Ця обставина обумовлює періодичний характер теплової роботи прес-форми.

Теоретичний аналіз теплової роботи прес-форми з урахуванням реальних умов однозначності зробити неможливо, тому доводиться шукати наближене вирішення задачі, зберігаючи при цьому її практичне значення.

Припустимо, що процес відбувається так довго, що початковий вплив втрачає свою дію на формування температурного поля, тобто об'єкт ізохронний, а в математичному плані – задача без початкових умов для процесу, який перейшов у квазівстановившийся тепловий стан.

В момент впуску металу в прес-форму на поверхні, що омивається, установлюється так звана температура контакту, яку можна розрахувати за формулою:

$$t_k = \frac{t_p}{\sqrt{\frac{c_{\phi} \lambda_{\phi} \rho_{\phi}}{c_p \lambda_p \rho_p} + 1}}, \quad (3.39)$$

де  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$c$  – середня питома теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;

$\lambda$  – теплопровідність,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ;

$\rho$  – густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Тут індекси -к, -р та -ф відносяться до параметрів відповідно контактної



поверхні, рідкого металу та прес-форми.

Температурне поле прес-форми знаходимо з умови не наскрізного одномірного нагріву напівобмеженої плоскої стінки при граничних умовах першого роду у вигляді осцилюючого функціоналу

$$\begin{cases} \partial(\Delta t)/\partial(\Delta \tau) = a_{\phi} \partial^2(\Delta t)/\partial x^2; (\Delta \tau > 0; 0 \leq x \leq \infty); \\ \Delta t|_{x=0} = \Delta t_*|_{x=0} \cos\left(\pi + 2\pi \Delta \tau / \tau_{\text{ц}}\right) \\ \partial(\Delta t)/\partial x|_{x \rightarrow \infty} = 0 \\ \Delta t|_{x \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (3.40)$$

де  $\Delta t$  – поточне значення періодичної складової температури прес-форми по ходу ливарного циклу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta \tau = \tau - n\tau_{\text{ц}}$  – поточний час ливарного циклу, що відраховується від моменту впуску металу в порожнину прес-форми, с;

$\tau$  – поточний час, с;

$n$  – кількість ливарних циклів;

$\tau_{\text{ц}}$  – тривалість ливарного циклу, с;

$a_{\phi}$  – температуропровідність матеріалу прес-форми,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$x$  – лінійна координата прес-форми в напрямі нормалі до поверхні сполучення виливка і форми, м;

$\Delta t|_{x \rightarrow 0} = 0,5(t_{\kappa} - \bar{t})$  – амплітуда коливань температури на контактній поверхні протягом ливарного циклу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\bar{t}$  – значення незмінної температури прес-форми,  $^{\circ}\text{C}$ .

Критерій можливості використання співвідношення періодичної теплопровідності в напівобмеженому масиві  $\chi$  для стінки кінцевої товщини  $\delta$  можна виразити співвідношенням

$$\chi = \sqrt{\pi \delta^2 / (a_{\phi} \tau_{\text{ц}})} > 2,5 \quad (3.41)$$

Наприклад, для прес-форми з  $\delta = 0,13$  м  $\chi = 16,9$ , що задовольняє умові (3.41).

Розв'язання системи (3.40) має вигляд

$$\Delta t = \Delta t_* \Big|_{x=0} \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{Fo_x}}\right) \cos\left(\pi + 2\pi \frac{\Delta \tau}{\tau_{\text{ц}}} - \sqrt{\frac{\pi}{Fo_x}}\right) \quad (3.42)$$

де  $Fo_x = a_{\phi} \tau_{\text{ц}} / x^2$  – критерій Фур'є, що варіюється в просторовій координаті.

Аналіз виразу (3.42) показує, що в будь-який момент циклу розподіл

температури в шарі, що прилягає до контактної поверхні, набуває форми хвилі, що коливається відносно неперіодичної складової температурного поля.

Амплітуда періодичної частини зменшується з глибиною по експоненціальному закону, що визначається множником  $\exp(-\sqrt{\pi / Fo_x})$ . Частота температурних коливань по товщині прес-форми співпадає з частотою коливань граничної умови, а фаза відстає від фази коливань температури на границі в міру віддалення від неї шару, що розглядається. Температурні градієнти в приграничному шарі прес-форми змінюють свій знак.

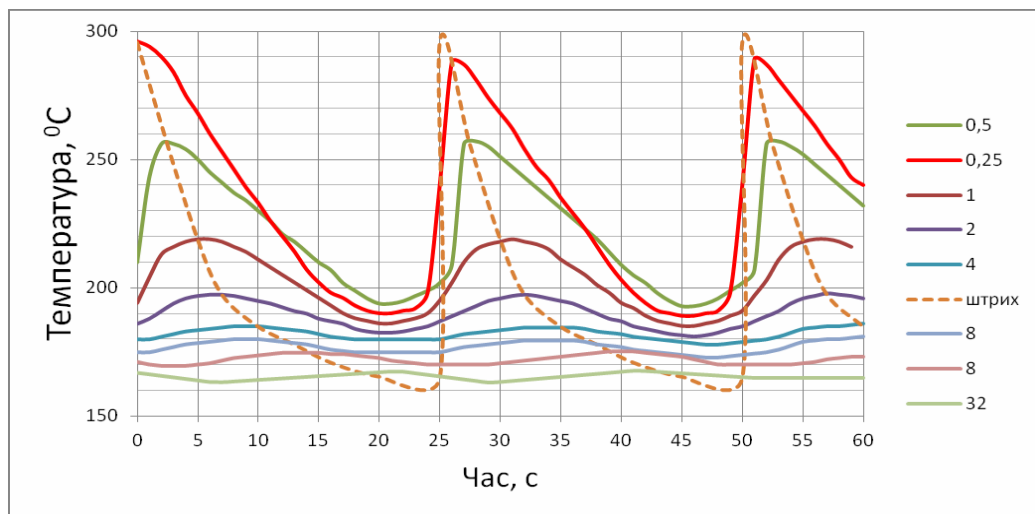


Рис. 3.10. Експериментальне температурне поле прес-форми при ритмічній роботі машини ЛПТ: вертикальні пунктирні лінії ( $\tau_{\text{ц}} = 0$ ) – моменти впуску металу в порожнину прес-форми; нахилені пунктирні лінії – траєкторії температурної хвилі, побудовані у відповідності з виразом (3.42); цифри біля кривих – відстані від контактної поверхні прес-форми, мм.

Приймемо відстань від контактної поверхні прес-форми до її перерізу в зоні незмінної температури як товщину активного шару. Очевидно, цей шар прес-форми при ритмічній роботі машини ЛПТ (квазівстановившийся тепловий режим) акумулює однакову кількість теплоти за час формування виливка і також деакумулює за час підготовки прес-форми. Швидкість зміни температури в активному шарі досягає  $2 \dots 5 \text{ } ^\circ\text{C/с}$ . Тепловий опір глибинних шарів прес-форми згладжує коливання температури. Глибина затухання температурної хвилі практично складає  $0,04 \text{ м}$  (рис. 3.6).

Запізнення настання максимальної температури на глибині  $x$  в порівнянні

з коливаннями температури на границі  $\delta_\tau$ , с, можна розрахувати за відомою формулою

$$\delta_\tau = 0,5x\sqrt{\tau_\tau/(\pi a_\phi)} \quad (3.43)$$

Температурне поле прес-форми визначаємо за формулою

$$\Delta t_{\text{макс}} = \Delta t_* \Big|_{x=0} \exp(-2\pi\delta\tau / \tau_\tau) \quad (3.44)$$

співставленням температуропровідності для теоретичних (3.43) та експериментальних (рис. 3.7) значень запізнення  $\delta_\tau$  досягнення максимальної температури прес-форми  $\Delta t_{\text{макс}}$ , °С, на глибині  $x$ . Отримане значення  $a_\phi$  виявилось в середньому на 17 % нижчим відносно теплофізичної температуропровідності матеріалу прес-форми  $7,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (сталь марки У8), що викликано, очевидно, похибкою виміру температури і нехтуванням залежності  $a_\phi f(t)$ .

Зумовлена переносом в активному шарі прес-форми поверхнева щільність теплового потоку  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, визначається за формулою

$$q = -\lambda_\phi \frac{\partial(\Delta t)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (3.45)$$

де  $\lambda_\phi = 37,6$  – теплопровідність матеріалу прес-форми, Вт/(м·К);  
 $x=0$  —

градієнт від гармонічної складової температурного поля на теплосприймаючій поверхні, °С/м.

Визначивши градієнт температури на поверхні стінки, запишемо вираз

$$q = \lambda_\phi \Delta t_* \Big|_{x=0} \sqrt{\frac{2\pi}{a_\phi \tau_\tau}} \cos\left(\pi + 2\pi \frac{\Delta\tau}{\tau_\tau} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (3.46)$$

Коливання поверхневої щільності теплового потоку прес-форми випереджають по фазі коливання температури контактної поверхні на  $\pi/4$ . Показники, що характеризують періодичний режим теплової роботи прес-форми, визначаються наступними співвідношеннями:

$$\omega = 2\pi / \tau_\tau; \quad (3.47)$$

$$f = \omega / (2\pi); \quad (3.48)$$

$$\Lambda = 2\sqrt{\pi a_\phi \tau_\tau}; \quad (3.49)$$

$$w = \Lambda / \tau_{\text{ц}}; \quad (3.50)$$

$$\xi = \exp\left(\sqrt{\pi / (a_{\phi} \tau_{\text{ц}})} x\right); \quad (3.51)$$

$$\bar{x} = \sqrt{a_{\phi} / \omega}; \quad (3.52)$$

$$x_{\xi} = \sqrt{a_{\phi} \tau_{\text{ц}} / \pi} \ln \xi; \quad (3.53)$$

$$\delta \tau_{\xi} = 0,5 x_{\xi} \sqrt{\tau_{\text{ц}} / (\pi a_{\phi})}; \quad (3.54)$$

$$q_{*}|_{x=0} = \lambda_{\phi} \Delta t_{*}|_{x=0} \sqrt{2\pi / (a_{\phi} \tau_{\text{ц}})}; \quad (3.55)$$

$$Q_y = \lambda_{\phi} \Delta t_{*}|_{x=0} \sqrt{2\tau_{\text{ц}} / (\pi a_{\phi})}; \quad (3.56)$$

$$\bar{q} = Q_y / (0,5 \tau_{\text{ц}}); \quad (3.57)$$

де  $\omega$  – кутова частота, рад/с;

$f$  – частота, Гц;

$\Lambda$  – довжина температурної хвилі, м;

$w$  – швидкість поширення хвилі, м/с;

$\xi$  – ступінь затухання хвилі по товщині прес-форми;

$\bar{x}$  – гіпотетична товщина рівномірно прогрітого активного шару прес-форми при осцилюючому впливі, м;

$x_{\xi}$  – глибина проникнення хвилі в товщу прес-форми при  $\xi$  – кратному зменшенні амплітуди, м;

$\delta \tau_{\xi}$  – час запізнення хвилі на глибині  $\xi$  – кратного зменшення амплітуди, с;

$q_{*}|_{x=0}$  – амплітуда коливань поверхневої щільності потоку на контактній поверхні прес-форми, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_y$  – питома витрата теплоти за напівперіод в активному шарі прес-форми, Дж/м<sup>2</sup>;

$\bar{q}$  – середня поверхнева щільність теплового потоку за півперіод в активному шарі прес-форми, Вт/м<sup>2</sup>.

За формулами (3.47)...(3.57) визначені числові значення показників:  $\omega = 0,25$  рад/с;  $f = 0,04$  Гц;  $\Lambda = 0,048$  м;  $w = 1,92 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $\xi|_{x=\Lambda} = \exp(2\pi) = 535$  (при декременті коливань –  $2\pi$ ),  $\bar{x} = 5,45 \cdot 10^{-3}$  м,  $x|_{\xi=535} = 48,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta \tau|_{\xi=535} = 24,9$  с;

$q_{*/x=0} = 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ ;  $Q_y = 4 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^2$ ;  $\bar{q} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . Розрахункові дані підтверджують постульовані умови однозначності. Амплітуда температурної хвилі до мізерного значення  $145/(2 \cdot 535) = 0,14 \text{ } ^\circ\text{C}$  затухає на відстані хвилі, причому  $\Lambda \ll \delta$ . Це свідчить про правильність геометричної апроксимації прес-форми напівобмеженою моделлю.

В практиці ЛПД для попереднього нагріву прес-форми використовують газові пальники та електронагрівачі. Останнім часом з цією метою все ширше використовуються установки для нагріву та охолодження форми рідкими теплоносіями [47, 73]. Найбільш важливий вузол – термостат, який пов'язаний з каналами нагріву-охолодження прес-форми гнучкими з'єднувальними рукавами. При застосуванні термостатів на перший план висувається точність регулювання температури рідкого теплоносія. Термостат, що являється теплоізованим, заповненим теплоносієм баком, працює наступним чином. Теплоносій, нагрітий трубчатими електронагрівачами, подається насосом по замкнутому контуру для підігріву в канали форми. Якщо температура теплоносія, що повернувся, вища заданої, припиняється нагрів та вмикається подача в теплообмінник охолоджувальної води. Установка може регулювати температуру одночасно в шести зонах, тобто обслуговувати одну велику або декілька малогабаритних прес-форм.

Структурна схема установки термостатування наведена на рисунку 3.11.

Температура прес-форми регулюється періодичним прокачування через теплообмінні канали в порожнині прес-форми 12 високотемпературної робочої рідини. Температура рідини регулюється в двох теплообмінниках 10, кожен з яких знаходиться в режимі нагріву або охолодження. Теплоносій перекачується насосом відповідного теплообмінника.

Термостатуюча рідина до заданої температури нагрівається двома електронагрівачами (ТЕН) 4, 5 і контролюється термопарами 6 типу ТХК. Термостат 10 охолоджується водою за допомогою теплових труб 11. Для запобігання руйнування теплообмінника при різкому пароутворенні холодоагенту спочатку електромагнітами 3 і 15 подається водо-повітряна суміш, яка поступово з включенням електромагніта 16 переводиться на водяний

компонент (електромагніти 3 і 15 при цьому відключаються).

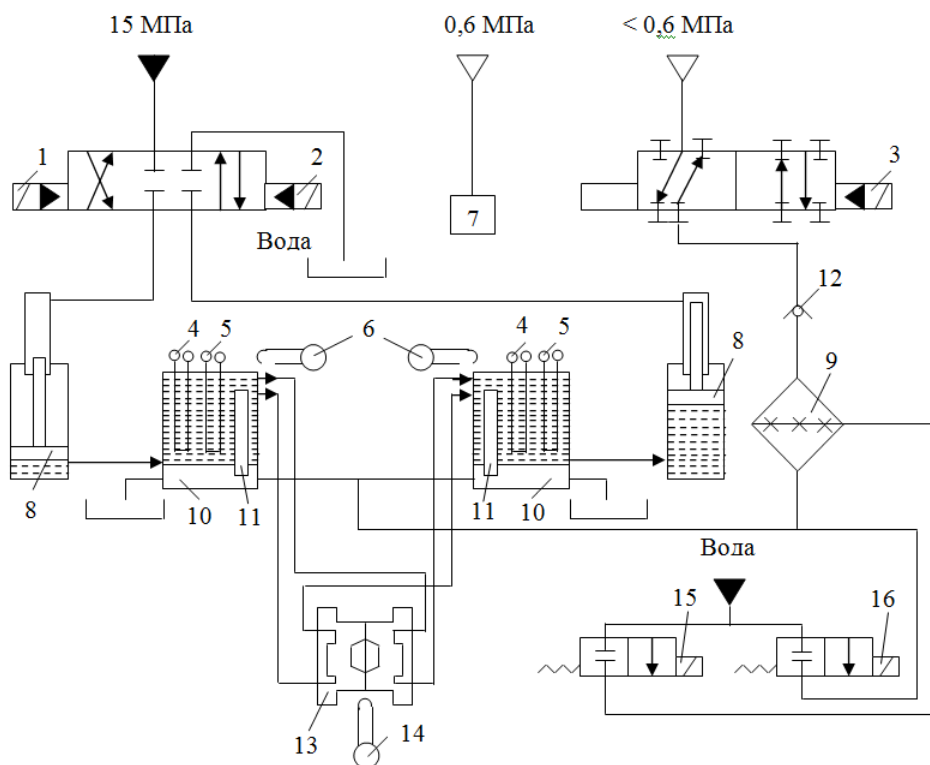


Рис. 3.11. Структурна схема установки термостатування

Наявність повітря в магістралі контролюють за допомогою реле тиску газу 7. Тепловий режим термостата коректується за показниками термопари 14, встановленої в прес-формі 13. [75]

Порядок включення електромагнітів і ТЕН термостата залежить від діапазонів відхилення температури прес-форми,  $\Delta t$  (табл. 3.3).

Якщо в якості регулятора використано мікропроцесорний пристрій, для підвищення точності термостатування прес-форми доцільно врахувати теплові втрати останньої.

Таблиця 3.5. Порядок включення електромагнітів і ТЕН термостата

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Електромагніти		ТЕН		Характер теплового впливу на термостатуючу рідину
	1 (2)	16 (3, 14)	4	5	
$> 5$	+	+			Охолодження
от 0 до 5					Без зміни
от 0 до $-2,5$	+		+		Нагрівання

от -2,5 до -5	+			+	Нагрівання
< -5	+		+	+	Нагрівання

Величина втрат визначається як функція тривалості ливарного циклу:

$$\Delta Q_{\text{вті}} = f(\tau_{\text{ц}(i-1)} - \tau_{\text{ц}}) = f(\Delta \tau_{\text{ц}}), \quad (3.58)$$

де  $\Delta Q_{\text{вті}}$  – зміна теплових втрат в  $i$ -му циклі в порівнянні з попереднім, Дж;

$\tau_{\text{ц}(i-1)}$  і  $\tau_{\text{ц}}$  – тривалість відповідно попереднього та очікувана поточного циклу, с;

$\Delta \tau_{\text{ц}}$  – приріст тривалості циклу, що залежить від тривалості кристалізації металу, с.

*Таблиця 3.6. Порядок включення електромагнітів и ТЕН термостата при врахуванні теплових втрат форми*

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta \tau_{\text{ц}}, \text{с}$	Електромаг- ніти		ТЕН		Характер теплового впливу на термостатуючу рідину
		1 (2)	3 (14)	4	5	
> 5	---	+	+			Охолодження
від 0 до 5	$\Delta \tau_{\text{ц}} > 0$					Без змін
	$\Delta \tau_{\text{ц}} < 0$	+	+			Охолодження
від 0 до -2,5	$\Delta \tau_{\text{ц}} < 0$	+		+		Нагрівання
	$\Delta \tau_{\text{ц}} > 0$	+			+	Нагрівання
від -2,5 до -5	$\Delta \tau_{\text{ц}} < 0$	+			+	Нагрівання
	$\Delta \tau_{\text{ц}} > 0$	+		+	+	Нагрівання
< -5	будь-яке	+		+	+	Нагрівання

Однак при такому регулюванні не враховується цілий ряд параметрів, які впливають на температуру прес-форми (накип в каналах прес-форми, товщина шару масла при змащуванні прес-форми).

При попаданні рідкого металу в ливарну форму остання нагрівається, причому товщина шару від робочої поверхні форми, в якому виникає значний температурний градієнт становить близько 30 мм [69]. Середню температуру прикордонного шару контролюють за допомогою термопар, гарячий спай якої встановлюють на глибині, рівній половині прикордонного шару. Переносні контактні термопар, наприклад термоелектричний термометр ТТЦ-I-02 забезпечують контроль температури без будь-яких додаткових пристроїв.



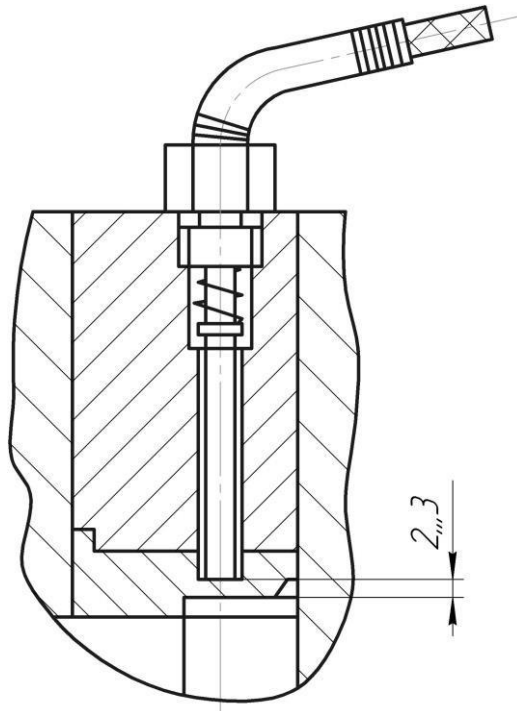


Рис. 3.12. Монтаж датчика для виміру температури.

Таким чином, можна вважати, що надлишкова ентальпія ливарної форми внаслідок нагріву виливком зосереджена в деякій наведеній масі,  $m_{\phi}^{\text{пп}}$  кг, що дорівнює

$$m_{\phi}^{\text{пп}} = K m_{\phi}, \quad (3.59)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від маси форми і дорівнює 0,10 – 0,14;

$m_{\phi}$  – маса ливарної форми, кг.

Надлишкову ентальпію ливарної форми можна виразити як

$$\Delta Q = c_{\phi} m_{\phi}^{\text{пп}} (t_{\phi} - t_3), \quad (3.60)$$

де  $\Delta Q$  – надлишкова ентальпія ливарної форми, Дж;

$c_{\phi}$  – середня питома теплоємність ливарної форми, Дж/(кг · °C);

$t_{\phi}$  – температура ливарної форми за показниками термopару у момент діставання виливка, °C;

$t$  – задана температура ливарної форми, °C.

Для робочого діапазону температур (150 – 300 °C) середня питома теплоємність ливарної форми становить 500 Дж / (кг · °C).

Надлишкова ентальпія ливарної форми компенсується охолодженням за допомогою теплоносія і теплових втрат у навколишнє середовище відповідно до виразу

$$\Delta Q = \int_{(\tau)} c_T (t_2 - t_1) V_T d\tau + q\tau_{\text{ц}}, \quad (3.61)$$

де  $c_T$  – середня питома теплоємність теплоносія, Дж/(м<sup>3</sup> · °C);

$t_2, t_1$  – температура теплоносія відповідно на виході й вході порожнини теплообміну ливарної форми, °C;

$\tau$  – поточний час, с;

$q$  – тепловий потік в оточуюче середовище, що залежить від конструкції ливарної форми і складає 10 – 20 кВт;

$\tau_{\text{ц}}$  – тривалість циклу виготовлення виливка, с.

Середня питома теплоємність теплоносія може бути визначена як

$$c_T = (c_0 [1 + 0,5\alpha(t_1 + t_2)]), \quad (3.62)$$

де  $c_0$  – питома теплоємність теплоносія при 0 °C, Дж/(кг · °C);

$\alpha$  – температурний коефіцієнт, °C<sup>-1</sup>.

При використанні в якості теплоносія масла, значення  $c_0 = 1785$  кДж/(м<sup>3</sup> · °C) і  $\alpha = 0,74 \cdot 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup> зі співвідношень (3.60) – (3.62) отримуємо:

$$c_{\phi} m_{\phi}^{\text{пп}} (t_{\phi} - t_3) - q\tau_{\text{ц}} = \int_{(\tau)} c_0 [1 + 0,5\alpha(t_1 + t_2)] (t_2 - t_1) V_T d\tau. \quad (3.63)$$

Рівність правої і лівої частин виразу (3.63) визначається тривалістю подачі теплоносія. Таким чином подачу теплоносія необхідно припинити у момент досягнення рівності виразу (3.63).

Вираз (3.63) також використовується для регулювання тривалості подачі теплоносія для нагріву ливарної форми. У цьому випадку обидві частини виразу (3.63) будуть менше нуля.

Система регулювання виконана на стандартних засобах вимірювання і регулюючому мікроконтролері. В якості датчиків температури застосовані датчики системи Метран-270МП, датчиків тиску і витрати датчики системи Метран-100, датчики вилучення виливки і наявності металу в прес- формі виконані на базі безконтактного датчика положення типу БК. Блоки управління охолодженням і нагріванням являють собою підсилювачі, що перетворюють

одиничний вихідний сигнал контролера в напруги  $\sim 110$  В для включення відповідно електромагнітного клапана магістралі охолоджуючої води і магнітного пускача, що керує нагріванням теплоносія.

Застосування системи регулювання температури ливарної форми скорочує брак на 1,5 % (відповідно знижується повернення), збільшує продуктивність машини ЛПТ на 2 % і підвищує стійкість прес-форми на 0,5 %.

### 3.4. Регулювання зусилля запирання

В основу технічного рішення покладено непрямий контроль зусилля запирання за величиною тиску масла в гідравлічному циліндрі замикання. Ідентифікація характерних ділянок на кривій зміни тиску масла в гідравлічному циліндрі замикання дозволяє однозначно інтерпретувати правильну настройку механізму замикання. Зусилля запирання контролюється тільки при закритій прес-формі. Автоматичне розпізнавання динаміки зміни тиску масла в гідравлічному циліндрі запирання дозволяє здійснювати контроль зусилля запирання прес-форми в машині лиття під тиском з більш високою надійністю.

Для визначення правильності спрацьовування механізму запирання контролювали тиск в циліндрі запирання. Встановлено, що поведінка кривої тиску в ході запирання ( рис. 3.13 ) повністю характеризує процес.

Процес при правильній роботі механізму запирання (рис. 3.13, *a* ) може бути інтерпретований таким чином. На початковій ділянці, точки 0 – 1, відбувається наростання тиску в гідравлічному циліндрі запирання до величини, достатньої для подолання тертя спокою в поршневих кільцях і манжетах ущільнення штока. Потім шток приходить в рух і вибираються зазори в шарнірах системи важеля, чим, мабуть, і пояснюються коливання тиску на ділянці 1 – 2. У момент часу (точка 3) відбувається змикання рухомої і нерухомої половин прес-форми і вибірка зазорів в місцях з'єднання напрямних колон машини і в пакеті прес-форми.

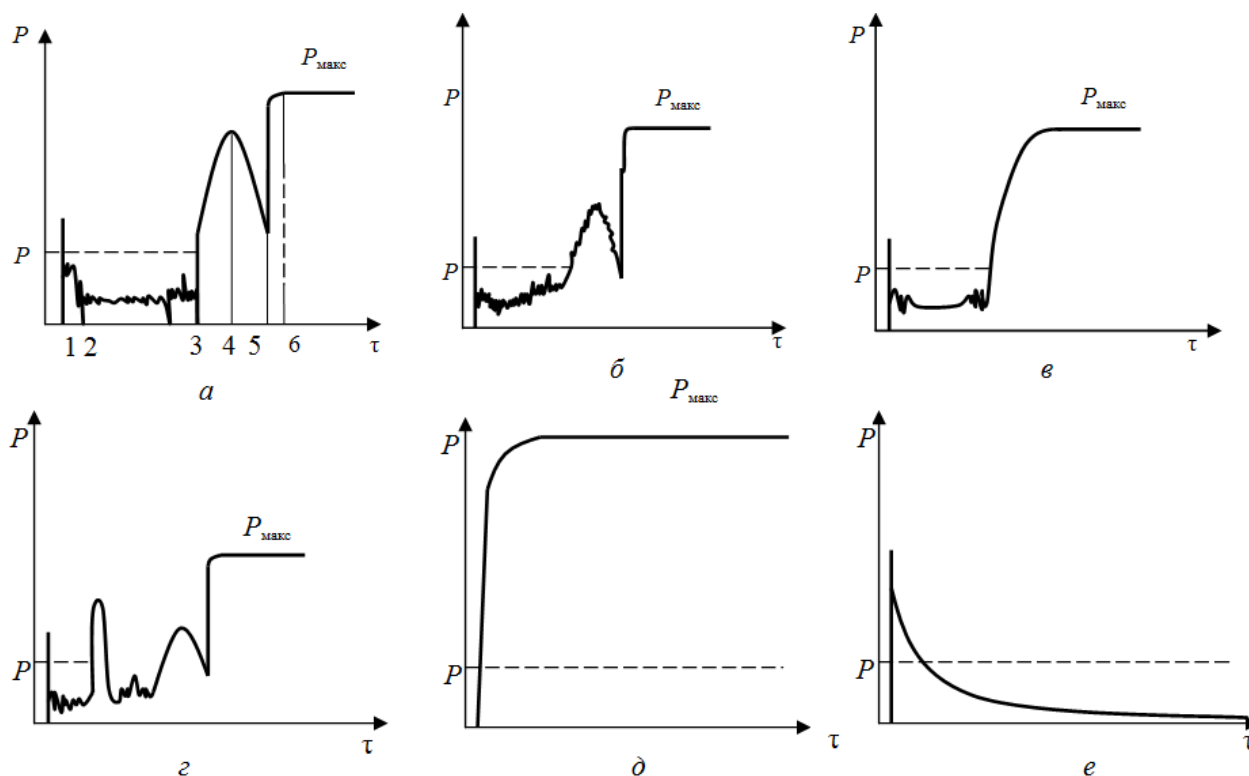


Рис. 3.13. Криві зміни тиску в гідроциліндрі механізму замикання в період змикання прес-форми  $\tau$ :  $P$  і  $P_{\text{макс}}$  – тиск в гідроциліндрі відповідно порогове і максимальне значення, що забезпечуються насосами машини ЛПТ.

На ділянці 3 – 5 (точки 3, 4, 5) відбувається пружна деформація елементів машини (розтягнення колон, стиснення важелів, вигин рухомої і нерухомої плит) і прес-форми (власне запирання), причому зусилля запирання в цей час збільшується від нуля (точка 3) до максимально можливого при даній настройці механізму запирання (точка 5). Протягом аналізованого періоду тиск рідини в гідравлічному циліндрі запирання зростає до місцевого "пікового" максимуму (точка 4) і знову падає в результаті зміни коефіцієнта підсилення системи важелів. Точки 3, 4, 5 відповідають значенням від десятих часток міліметрів шляху переміщення рухомої плити при невеликих зусиллях запирання до 1 – 2 мм для зусиль запирання порядку 1000 – 3000 кН. Потім в результаті упору шток циліндра зупиняється і тиск зростає до максимального в гідросистемі машини (точка 6).

Для порівняння на рис. 3.13, б представлена крива, аналогічна кривій 3.13, а, яка свідчить про правильну роботу механізму, але з меншим зусиллям

запирання.

Криві (рис. 3.13, в, г, д, е) свідчать про те, що механізм запирання або налаштований неправильно (рис. 3.13, в), або несправний. У цьому випадку ливарний цикл повинен бути заблокований. Крива (рис. 3.13, в) виходить у випадку настройки механізму на неприпустимо велике зусилля запирання. Відстань між рухомою і нерухомою плитами машини задається в цьому випадку занадто малою для повного випрямлення важелів і при запресовуванні металу зусилля від тиску його в прес-формі частково передається на шток циліндра, в результаті чого відбувається віддача рухомої плити і, як наслідок, викид металу.

На кривій (рис. 3.13, г) сталося передчасне наростання тиску до моменту змикання двох половин прес-форми. Така ситуація можлива при пошкодженні механізму замикавання, наприклад осей шарнірів, неприпустимих за величиною задірів, відсутність мастила в шарнірах і т.п.

Крива (рис. 3.13, д) свідчить про те, що шток гідроциліндра не почав рух, в результаті чого, вже на початку циклу роботи механізму тиск робочої рідини підвищилося до максимального значення, яке забезпечують насоси машини. Такий варіант можливий при заклинювання поршня в циліндрі, піднятті манжет, механічного пошкодження системи важеля.

Нарешті, по кривій (рис. 3.13, е) можна зробити висновок про несправність гідравлічної частини машини (не спрацьовує електромагнітний клапан, порушена герметичність системи і т.п.).

Керованим обладнанням є гідроричажний механізм замикавання прес-форми. Принцип його дії показаний на рис. 3.14 (на схемі умовно наведена верхня симетрично розташована шарнірно-важільна система). При передачі тиску з гідросистеми в ліву порожнину замикаючого циліндра поршень зі штоком 3 переміщується, в результаті чого кут збільшується, шарніри 5 і 6 піднімаються, а важелі 5-2-6 і 6-7 розпрямляються, пересуваючи рухливу плиту 8 з укріпленою на ній рухомою половиною прес-форми, і притискають її до нерухомої половини.

При повному випрямленні важелів 5-2-6 і 6-7 розмір 2-7 буде приблизно

дорівнює сумі довжин 2-6 і 6-7 без величини їх пружної деформації.

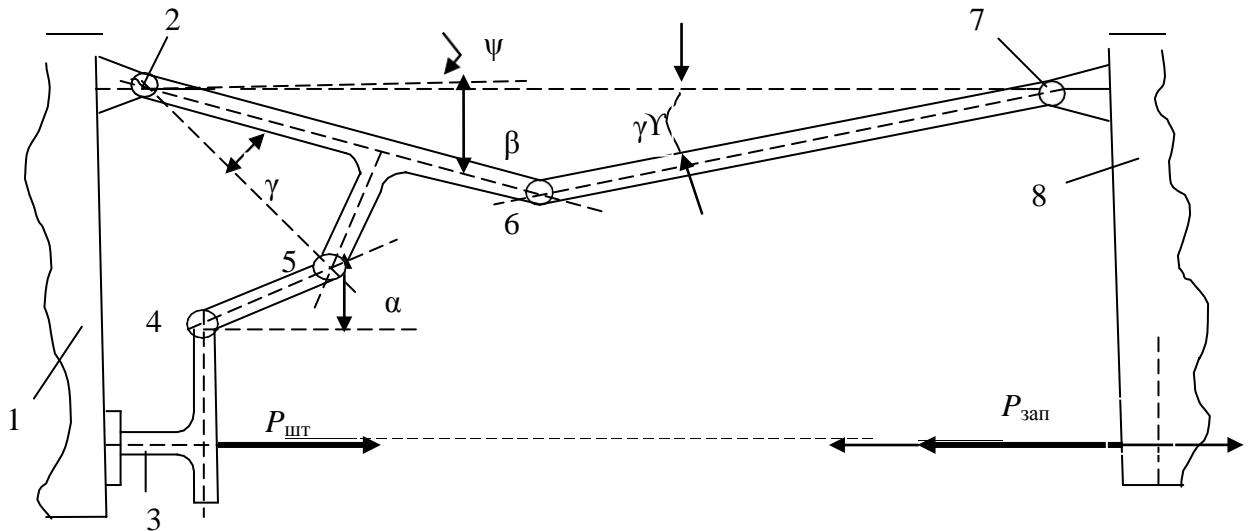


Рис. 3.14. Схема механізму запирання машини ЛПТ:

1 – упорна плита; 2, 4, 5, 6, 7 шарніри; 3 – шток гідроциліндра замикавання; 8 рухома плита.

Зусилля запирання прес-форми визначається сумою пружних деформацій при стисненні важелів, розтягуванням напрямних колон, стисненням пакета прес-форми і вигином рухомої 8 і упорної 1 плит.

Співвідношення між зусиллям запирання машини  $P_{зап}$  і зусиллям на штоку гідроциліндра  $P_{шт}$  визначається коефіцієнтом підсилення шарнірно-важельної системи

$$P_{зап} = \eta P_{шт} \quad (3.64)$$

При розгляді сил, що діють на шарнірно важільну систему, знайдемо коефіцієнт підсилення

$$\eta = \frac{l_{2-5} \sin(\beta + \psi + \varphi) + \frac{\chi r_5}{\cos \alpha} + \frac{\chi r_2}{\cos(\beta + \psi)} + \frac{l_{4-5} \sin \alpha - \frac{\chi(r_1 - r_5)}{\cos \alpha}}{l_{4-5} \cos \alpha} l_{2-5} \cos(\beta + \psi + \varphi)}{l_{2-6} \sin(\beta + \psi) + \frac{\gamma r_6}{\cos(\gamma - \psi)} + \frac{\gamma r_2}{\cos(\beta + \psi)} + \frac{l_{6-7} \sin(\gamma - \psi) + \frac{\gamma(r_6 + r_7)}{\cos(\gamma - \psi)}}{l_{6-7} \cos(\gamma - \psi)} l_{2-6} \cos(\beta + \psi)}, \quad (3.65)$$

де  $l_{2-5}$ ,  $l_{2-6}$ ,  $l_{4-5}$ ,  $l_{6-7}$  – довжини відповідних важелів;

$\alpha, \beta, \gamma, \varphi, \psi$  – величина кутів;

$\chi$  – коефіцієнт тертя;

$r_1, r_2, r_5, r_6, r_7$  – радіуси осей відповідних шарнірів.

Аналогічно визначаємо залежність коефіцієнта підсилення від положення рухомої плити 8 відносно площини змикання прес-форми  $\eta(x)$  (рис. 3.10). Отримана залежність складна в реалізації, проте достатньо точно може бути апроксимована функцією

$$\eta = A/(x + B), \quad (3.66)$$

де коефіцієнти  $A$  і  $B$  визначаємо методом найменших квадратів.

Слід зазначити, що точна апроксимація кривої важлива лише на останніх 2 ... 3 мм шляху рухомої плити 8, тобто в момент, коли починається процес запирання прес-форми.

Вважаємо, що пружні ланки машини ЛПТ деформуються згідно закону Гука

$$P_{\text{зап}} = cy, \quad (3.67)$$

де  $c = k_1 / (\frac{1}{n_1 c_{\text{кол}}} + \frac{1}{n_2 c_{2-6}} + \frac{1}{n_3 c_{6-7}})$  – жорсткість пружної системи.

$k_1 = 1, 4 \dots 1, 5$  – коефіцієнт, що враховує жорсткість неврахованих елементів;  
 $c_{\text{кол}}$ ,  $c_{2-6}$ ,  $c_{6-7}$  – жорсткість колони і відповідних важелів, що визначається з урахуванням інформації про модуль пружності Юнга  $E_i$ , площі поперечного перерізу елементу  $\Omega_i$  і його довжини  $l_i$ :  $c_i = E_i \Omega_i / l_i$ ;  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – число паралельно працюючих елементів.

На рисунку 3.10 показана залежність  $P_{\text{зап}}(y)$  для трьох кінцевих значень деформації  $y_{\text{зап}}$ . При зміні  $y$  від нуля до  $y_{\text{зап}}$  зміна  $x$  відбувається по залежності

$$x = y_{\text{зап}} - y. \quad (3.68)$$

Формула (3.66) трансформується у вираз

$$\eta = A/(y_{\text{зап}} - y + B). \quad (3.69)$$

З іншої сторони, з урахуванням відношення (3.67) маємо

$$\eta = cy/P_{\text{шт}}. \quad (3.70)$$

Співставляючи (3.68) і (3.69), отримуємо

$$P_{\text{шт}} = cy(y_{\text{зап}} - y + B)/A. \quad (3.71)$$

Так як кінцеве значення зусилля замикавання  $P_{\text{зап.к}}$

$$P_{\text{зап.к}} = cy_{\text{зап}}, \quad (3.72)$$

то з (3.70) отримуємо

$$P_{шт} = cy^2/A + [(P_{зап.к} + B)/A]y. \quad (3.73)$$

Згідно з алгоритмом управління контроль зусилля запирання прес-форми проводиться по максимальному піковому тиску в гідроциліндрі (рис. 3.9, *a* – ордината відповідна моменту 4). Для аналітичного виразу максимального пікового тиску знайдемо

$$dP_{шт}/dy = -2cy/A + (P_{зап.к} + BC)/A. \quad (3.74)$$

Прирівнявши похідну нулю, знаходимо  $y_{макс}$ , відповідне значенню  $P_{шт.макс}$

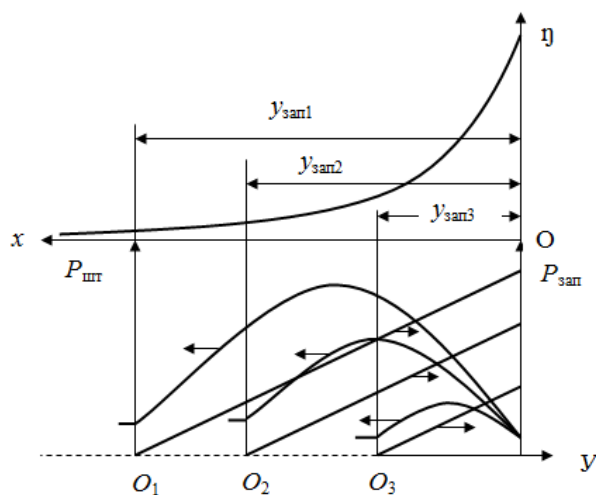
$$y_{макс} = (P_{зап.к} + BC)^2/(4AC). \quad (3.75)$$

З урахуванням гідравлічних втрат і геометричних розмірів поршня циліндра замикання зусилля на штоку 3 неважко перерахувати в тиск робочого тіла. Для максимального пікового тиску в гідроциліндрі

$$P_{макс.п} = (P_{зап.к} + BC)^2/(AC\pi D^2 k_2), \quad (3.76)$$

де  $D$  – діаметр поршня;

$k_2$  – коефіцієнт, що враховує втрати на тертя в ущільненнях поршня й штока ( $k_2 < 1$ ).



Отримана параболічна залежність (рис. 3.15) пояснює характерний пік на кривій зміни тиску масла при замиканні прес-форми.

Рисунок 3.15. Залежність коефіцієнта підсилення  $\eta$ , зусилля на штоці гідроциліндра  $P_{шт}$  і зусилля запирання  $P_{зап}$  від величини деформації  $X$

На рис. 3.15 наведена блок-схема пристрою контролю зусилля запирання прес-форми. Шарнірно - важільний механізм 1 шарнірно з'єднаний з рухомою і нерухомою плитами 2 і 3 машини лиття під тиском (на рис. 3.12 умовно не відображено нижня симетрично розташована група важелів).



Під позицією 4 зображений таймер. Вихід блоку 5 пам'яті через блок 6 затримки з'єднаний з ключем 7. Датчик 8 тиску масла в гідравлічному циліндрі 9 з'єднаний через ключ 7 з блоком 10 порівняння, вихід якого через блок І 11 з'єднаний з блоком АБО 12. Шток поршня гідравлічного циліндра 9 замикає шарнірно з'єднаний з шарнірно - важільним механізмом 1. Вихід блоку АБО 12 сполучений з входом блоку 13 індикації. Таймер 4 через блок НІ 14 з'єднаний з другим входом блоку І 11. Блок 10 порівняння підключений до блоку І 15, другий вхід якого підключений через блок 16 сигналізації та диференціатор 17 на ключ 7. Вихід блоку І 15 з'єднаний через диференціатор 18 з лічильником 19. Вихід лічильника 19 з'єднаний зі схемами скидання таймера 4, блоку 5 пам'яті, виходом блоку АБО 12 і входом блоку 13 індикації. Вихід блоку 12 з'єднаний також зі схемою скидання лічильника 19. Вихід ключа 7 з'єднаний зі входом блоку 20 пам'яті. Вихід блоку І 15 приєднаний до блоку 20 пам'яті через блок І 21 і безпосередньо до блоку 22 пам'яті, вихід останнього зв'язаний через блок 23 затримки, блок НІ 24 з другим входом блоку І 21. Вихід блоку 20 пам'яті з'єднаний через суматор 25, суматор 26 з ключем 27, який також зв'язаний з виходом блоку І 21. Вихід суматора 25 з'єднаний зі входом блоку 13 індикації. Вихід ключа 27 зв'язаний через блок 28 затримки з блоком І 29 і безпосередньо з входом блоку 13 індикації. Вихід лічильника 19 з'єднаний зі схемами скидання блоку 22 пам'яті й другим входом блоку І 29.

Блок 13 індикації (рис. 3.15) містить сигнальне табло 30 "Блокування", сигнальне табло 31 "Закрито", елемент НІ 32, з'єднаний з елементами І 33 і 34. Другий вхід елемента І 33 з'єднаний з суматором 25, а вихід – з сигнальним табло 35 "Менше". Другий вхід елемента І 34 з'єднаний з елементом НІ 36, а вихід – з сигнальним табло 37 "Більше".

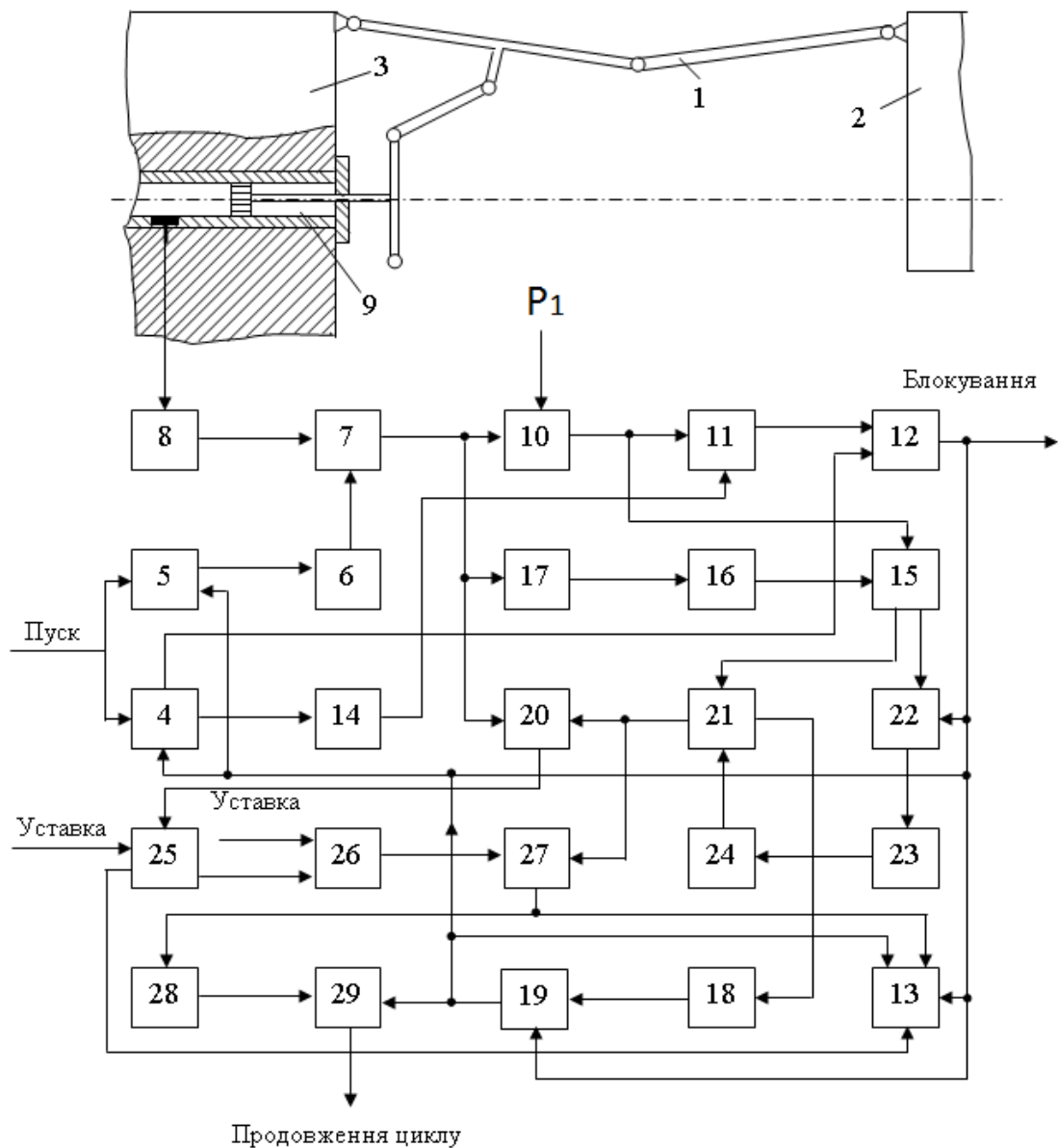


Рис. 3.16. Блок-схема пристрою контролю зусилля замирання прес-форми

Пристрій працює наступним чином (рис. 3.16). При підвищенні тиску робочого тіла гідросистеми в лівій порожнині циліндра відбувається переміщення вправо поршня зі штоком, в результаті чого за допомогою шарнірно - важільного механізму 1 віддається рухома плита 2 машини з укріпленою на ній рухомою половиною прес-форми (на рисунку не показана) від упорної плити 3 машини. При цьому рухома половина прес-форми змикається з нерухомою з певним зусиллям замикання.

Сигнал на замикання прес-форми "Пуск", що надходить від Якщо тиск масла вище уставки, що можливо, якщо шток гідравлічного циліндра замикання не прийшов в рух (рис. 3.9, д) або відбулося передчасне наростання тиску (рис. 3.9, з), то на виході блоку 10 з'являється одиничний сигнал, який проходить

через блок І 11 і блок АБО 12, блокує цикл машини лиття під тиском, сигналізуючи про її несправність. Одночасно цей же сигнал скидає таймер 4, блок 5 пам'яті й надходить на вхід блоку 13 індикації. Якщо тиск масла нижче уставки, то на вхід блоку АБО 12 поступає нульовий сигнал. Після закінчення часу, відповідного мінімальної тривалості замикання прес-форми, з першого виходу таймера 4 надходить одиничний сигнал, який інвертується в блоці НІ 14 і замикає блок І 11, тобто надалі при появі одиничного сигналу з виходу блоку 10 порівняння блокування циклу машини не відбувається. Одиничний сигнал з виходу блоку 10 порівняння надходить на вхід блоку І 15. На блок 16 сигналізації подається вихідний сигнал з диференціатора 17, на вхід якого надходить сигнал, що пропорційний тиску. На вході блоку сигналізації з'являється одиничний сигнал при настанні умови (рис. 3.13 , а точка 4). Інформація з виходу блоку 16 сигналізації надходить на другий вхід блоку І 15, на виході якого також з'являється одиничний сигнал. Напруга з виходу блоку І 15 проходить через диференціатор 18, на якому формується імпульсний сигнал на лічильник 19 імпульсів. При поданні на лічильник 19 трьох імпульсів (рис. 3.13, а, точки 4 , 5 і 6) на виході лічильника 19 з'являється одиничний сигнал, що свідчить про нормальний хід процесу замикання прес-форми. Цей сигнал надходить на вхід блоку 13 індикації і скидає таймер 4 і блок 5 пам'яті. При відсутності сигналу з виходу лічильника протягом часу, відповідного максимальній тривалості замикання прес-форми, що свідчить про несправність гідравлічної частини машини (рис. 3.13, е) або неправильного її налаштування (рис. 3.13, в), спрацьовує таймер 4 і з його другого виходу надходить сигнал про неспрацьовування механізму замикання прес-форми, який поступає через блок АБО 12 на перший вхід блоку 13 індикації, в схему таймера 4, блок 5 пам'яті і на блокування циклу машини.

При надходженні сигналу на вхід блоку 13 індикації (рис. 3.17) запалюється сигнальне табло 30 "Блокування ", а при надходженні його на другий вхід – сигнальне табло 31 "Закрито". Сигнал про тиск масла в гідравлічному циліндрі 9 замикання надходить з ключа 7 на блок 20 пам'яті. Сигнал дозволу запису в блок 20 пам'яті формується у блоці І 21. При

надходженні одиничного сигналу з блоку І 15 на перший вхід блоку І 21, тобто при досягненні тиском масла екстремального значення цей сигнал одночасно надходить і на блок 22 пам'яті, де запам'ятовується і подається через блок 23 затримки на вхід блоку НІ 24.

Сигнал з виходу блоку НІ 24 надходить на другий вхід блоку І 21. При першому досягненні тиском масла екстремального значення на перший вхід блоку І 21 надходить одинична напруга. Така ж напруга надходить на другий

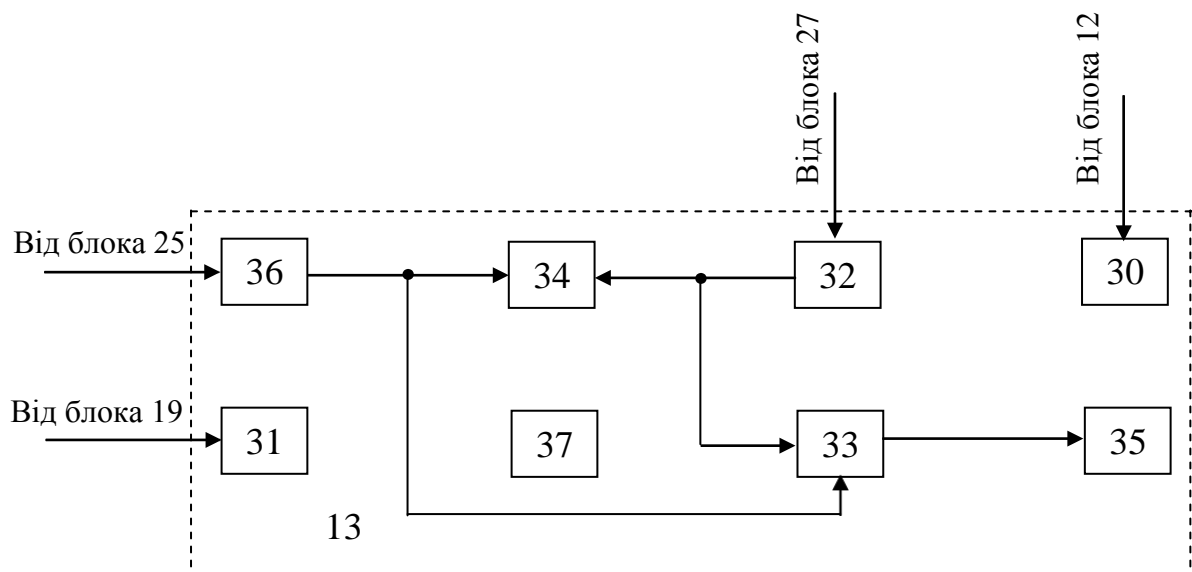


Рис. 3.17. Блок-схема блока індикації

вхід блоку І 21. Далі одинична напругу з блоку 22 пам'яті затримується в блоці 23 затримки й інвертується в блоці НІ 24. Блок І 21 закривається. Наступні екстремуми тиску масла не формують сигналу дозволу запису в блок 20 пам'яті. Екстремальний тиск масла в гідравлічному циліндрі замикання алгебраїчно підсумовується з номінальним значенням в суматорі 25 і результуючий сигнал надходить зі значимого виходу на другий суматор 26, де порівнюється з допустимою величиною відхилення тиску запирання від номінального значення. При знаходженні різниці в допуску зі знакового виходу суматора 26 на вхід блоку 13 індикації через ключ 27 надходить одинична напруга, а при виході з допуску – нульова. Ключ відкривається в момент спрацювання блоку І 21. Напруга зі знакового виходу суматора 26 також надходить через ключ 27 і блок 28 затримки в блок І 29, другий вхід якого зв'язаний з виходом лічильника 19. При появі одиничної напруги з виходу блоку І 29 подається

сигнал на продовження циклу машини. При надходженні одиничного сигналу в блок 13 індикації від блоку АБО 12 спрацьовує перше сигнальне табло 30 "Блокування", при надходженні одиничного сигналу від лічильника 19 спрацьовує друге сигнальне табло "Закрито". При надходженні одиничного сигналу від ключа 27 цей сигнал інвертується в елементі НІ 32 і замикає елементи І 33 і 34 . Нульовий сигнал з ключа 27, що свідчить про надмірно високе або низьке зусилля замикання, інвертується в елементі НІ 32, готує до спрацьовування елементи І 33 і 34. При появі одиничного сигналу на знаковому виході суматора 25, тобто при значенні тиску масла в гідравлічному циліндрі замикання нижче уставки, спрацьовує елемент І 33 і включає третє сигнальне табло "Менше". При надходженні нульового сигналу зі знакового виходу суматора 25 цей сигнал інвертується в елементі НІ 36 і включає елемент І 34, який подає сигнал на включення четвертого сигнального табло 37 "Більше". Одночасно зі скиданням таймера 4 і блоку 5 пам'яті напруга скидання надходить також на блок 22 пам'яті і лічильник 19. Як датчик тиску використовується датчик типу Метран - 100 ДИ, блоків порівняння і сигналізації - блоки АКЕСР, блоків НІ, АБО, І, пам'яті, затримки, ключів, таймера, суматорів, диференціаторів і лічильника – стандартні блоки обчислювальної техніки.

Таким чином, пропонований пристрій здійснює контроль зусилля запирання прес-форми в машині лиття під тиском з більш високою надійністю, так як цей сигнал формується тільки при замкненій прес-формі.

Контроль зусилля запирання прес-форми за характером зміни тиску в циліндрі замикання дозволяє автоматично з високою надійністю визначити шуканий параметр. При цьому діагностується як нормальний режим механізму замикання, так і аварійний з аналізом причин відмови.

Для реалізації алгоритму визначення зусилля запирання за величиною тиску в гідроциліндрі, окрім інформації про тиск, який вимірюється датчиком Метран - 100ДИ, на вхід контролера управління подаються сигнали з позиційних датчиків: рухома плита 8 в положенні "Замкнута" або "Відкрита". Використання описаного алгоритму на Полтавському заводі "Електромотор"

виключило виплески металу при пресуванні, що збільшило вихід придатного на 0,3 % і продуктивність машини на 0,5 %.

### 3.5. Підсистема регулювання швидкості прес-поршня

Швидкість пресування – один з головних параметрів, що характеризують технологічний режим ЛПТ. За відомою величиною швидкості пресування на основі напівемпіричних залежностей можна визначити такі параметри процесу, як тривалість заповнення порожнини форми і швидкості впуску металу у форму.

Оптимальне заповнення металом прес-форми забезпечується його введенням в прес-камеру з постійним прискоренням і подальшою запресовкою з постійною швидкістю. Шлях прес-поршня можна розбити на кілька характерних ділянок з відповідними законами регулювання. Перша ділянка 0,03 ... 0,1 м визначає рух прес-поршня до перекриття заливного вікна. Для запобігання виплеску металу з вікна прискорення на цій ділянці має бути невеликим – 0,1 ... 1 м/с<sup>2</sup>. Після того як прес-поршень перекриє заливальне вікно, починається другий етап запресовування, на якому потрібно якнайшвидше досягти заданої величини швидкості прес-поршня з великим прискоренням. Швидкість запресовування – від 0,2 до 10 м/с, а прискорення – від 1 до 1200 м/с<sup>2</sup>. По досягненні швидкості прес-поршня заданого значення починається третя ділянка запресовування, що характеризується постійною швидкістю поршня.

Традиційно управління швидкістю прес-поршня здійснюється по пройденому шляху, швидкості прес-поршня і його прискоренню. При цьому моменти перемикавання режимів руху прес-поршня, відлік яких ведеться від його кінцевого положення, визначаються пройденим шляхом. Однак розрахункове кінцеве положення і режим введення металу змінюється залежно від маси і фізичних властивостей (температури, в'язкості) останнього. Некомпенсована зміна цих параметрів призводить до таких дефектів у виливках як незливи і газонасиченість.

Як показали дослідження [101] фази високої швидкості пресування необхідно включити до того, як ступінь заповнення камери пресування складе 100 %. Якщо ця фаза почнеться при повному заповненні камери, то при розгоні прес-поршня в момент переходу з фази повільної швидкості до високої станеться передчасне охолодження металу в ливниковій системі і його часткова кристалізація. Це зменшить площу живого перетину живильника і робочу швидкість пресування. Передчасне ж включення фази високій швидкості призведе до підвищеного вмісту газів в металі. Своєчасне перемикавання ступенів швидкості дозволяє отримати оптимальні характеристики розгону прес-поршня, і за рахунок цього підвищити точність регулювання.

Керування швидкістю прес-поршня здійснюється по пройденому ним ефективному шляху  $L$ , м, що визначається за формулою

$$L = (n + \Delta n_1)L^*, \quad (3.77)$$

де  $n$  – число імпульсів, що надходять з датчика ходу прес-поршня;

$\Delta n_1$  – поправка;

$L^*$  – шлях, що пройдений щільною лінійкою між двома послідовними імпульсами, м.

Поправку до числа імпульсів  $\Delta n_1$  визначають залежно від маси, температури і в'язкості металу за формулою

$$\Delta n_1 = [1 + \alpha_1 m/m_n - \alpha_2 (t - t_n) + \alpha_3 (\vartheta - \vartheta_n)]/L^*, \quad (3.78)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коефіцієнти;

$m, m_n$  – відповідно фактичне і нормоване значення дози металу, кг;

$t, t_n$  – відповідно фактичне і нормоване значення температури металу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\vartheta, \vartheta_n$  – фактичне і нормоване значення кінематичної в'язкості металу,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Значення коефіцієнтів для машини ЛПТ типу АЛ711Б08 для стакану діаметром  $d = 0,09$  м дорівнюють  $\alpha_1 = 0,87$  м,  $\alpha_2 = 0,019$   $\text{м}^0/\text{C}$ ,  $\alpha_3 = 0,24 \cdot 10^4$   $\text{с}/\text{м}$ . Для інших значень діаметрів стакану  $d^*$  коефіцієнти визначаються за формулою

$$\alpha_i^* = \alpha_i d^2 / (d^*)^2. \quad (3.79)$$

Пристрій регулювання швидкості прес-поршня (рис. 3.18) працює наступним чином.

При отриманні ініціативного сигналу з виходу блоку запуску-зупинки 12 (сигнал початку запресовування) проводиться скидання-запуск таймера 13 і блоку формування керуючого впливу 9. З блоку 9 видається на пропорційний золотник 8 (дроселюючий гідророзподільник С 1250 в комплекті з блоком управління БУГ-02-И1) керуючий вплив, що дорівнює початковій уставці  $I_0$ . Золотник 8 відкривається, робоча рідина надходить у гідравлічний циліндр 1, шток 2 приводить в рух прес-поршень 3. З штоком 2 жорстко зв'язана щілинна лінійка датчика ходу прес-поршня 6 (вимикач імпульсів ДФ-4У1).

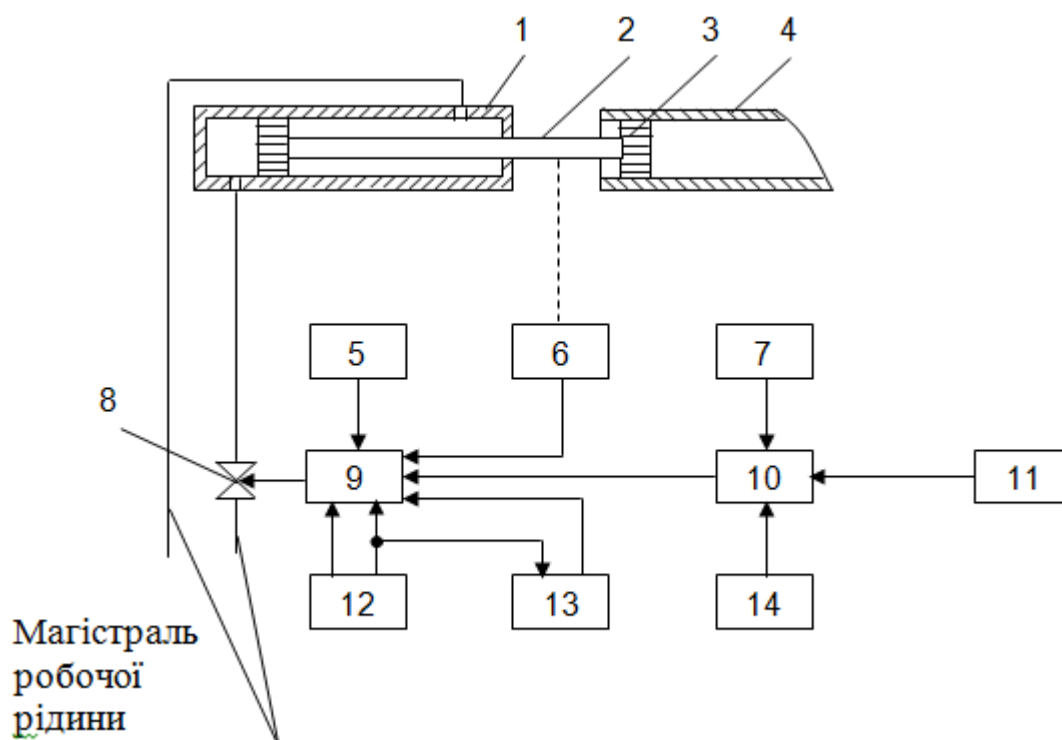


Рис. 3.18. Структурна схема пристрою регулювання швидкості прес- поршня машини ЛПТ

Показники датчика 6 безперервно надходять в блок формування керуючих впливів 9, який опитує таймер 13, операційний блок 10 і робить обчислення ходу прес-поршня за формулою (3.77). Потім проводиться порівняння пройденого шляху прес-поршнем з уставкою початку розгону  $L1$  (першої ділянки шляху прес-поршня, відповідного проходженню заливного отвору камери 4 пресування). При виконанні умови  $L \leq L1$  – керуючий вплив  $I_0$ , при виконанні умови  $L1 \leq L \leq L2$ , де  $L2$  – уставка довжини другої ділянки ходу прес-поршня,  $m$ , – керуючий вплив  $I_1$ , мА, визначається залежно від швидкості прес-поршня



$$I_1 = k_1 v_y - k_2 (v - v_y), \quad (3.80)$$

де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти пропорційності для даних умов, що відповідно дорівнюють 0,2 і 0,9 мА·с·м<sup>-1</sup>;

$v_y, v$  – уставка і поточне значення швидкості прес-поршня, м/с.

Корегування коефіцієнтів пропорційності для інших діаметрів стакану проводиться аналогічно до коригування коефіцієнтів за формулою (3.79).

Поточна швидкість прес-поршня визначається за формулою

$$v = L^* / \Delta\tau, \quad (3.81)$$

де  $\Delta\tau = \tau_{(i+1)} - \tau_i$  – проміжок часу між двома послідовними опитуваннями таймера, с;

$i$  – порядковий номер опитування.

Уставка швидкості прес-поршня розраховується за формулою

$$v_y = \sqrt{2a_y(L - L_1) + v_1^2}, \quad (3.82)$$

де  $a_y$  – уставка прискорення прес-поршня на другій ділянці його ходу, м/с<sup>2</sup>;

$v_1$  – швидкість прес-поршня на першій ділянці, м/с.

При виконанні умови  $L > L_2$  керуючий вплив встановлюється рівним максимальному значенню  $I_{\text{макс}}$ , мА:

$$I_{\text{макс}} = k_1 v_{\text{макс}}, \quad (3.83)$$

де  $v_{\text{макс}}$  – уставка максимальної швидкості прес-поршня, м/с.

При надходженні сигналу з виходу блоку запуску-зупинки 12 (сигнал розмикання плит) з блоку формування керуючих впливів 9 на золотник 8 надходить сигнал  $I = 0$ .

Напруга, що пропорційна температурі металу, поступає від датчика 11 (термопара ТХА-0515 в графітовому наконечнику), напруга, що пропорційна масі металу, – від датчика 7 (тензометричний перетворювач типу ДСТБ-С-060, змонтований на заливальному пристрої), а напруга, пропорційна в'язкості металу, від датчика 14, структурна схема якого наведена на рисунку 3.16.

В'язкість металу визначається за швидкістю його зливу зі заливного ковша в заливальну машину. По мірі зливу заданої маси порушується контакт між рідким металом і верхнім контактним датчиком 2 (датчики встановлені в

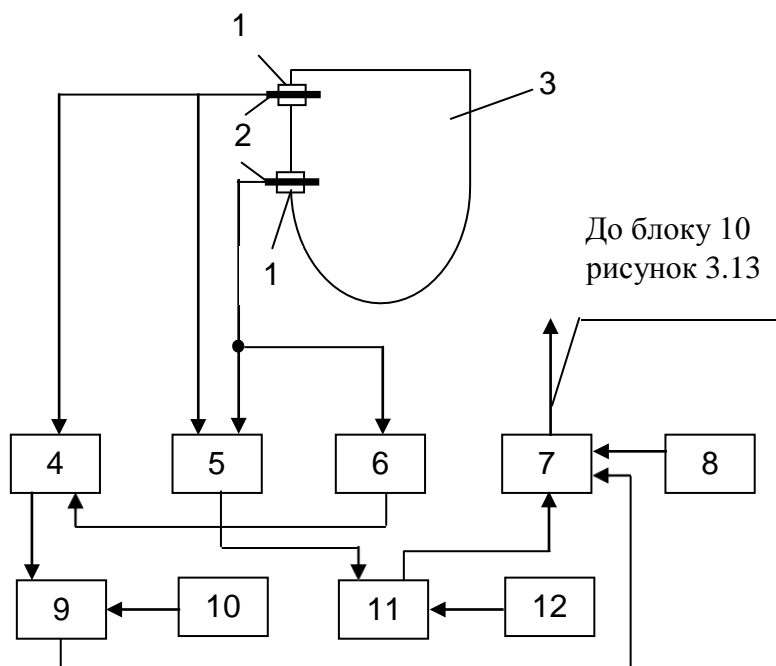


Рис. 3.19. Структурна схема датчика в'язкості

заливальному ковші 3 через вогнетривкі діелектричні пробки 1). Одиничний сигнал від верхнього контактного датчика 2 надходить у вузол «І» 4, а нульовий сигнал від нижнього контактного датчика 2, інвертується у вузлі «НІ» 6, також надходить у вузол «І» 4. Одинична напруга з виходу блоку 4 включає ключ 9, що подає імпульс для скидання запуску інтегратора 7, підсумовуючого постійний вихідний сигнал зі струмового задатчика 8. При подальшому зливі порушується контакт між рідким металом і нижнім контактним датчиком 2. На виході другого вузла «І» 5 з'являється одинична напруга, яка провадить через ключ 11 зупинку інтегратора 7, вихідна напруга якого пропорційна в'язкості металу при зливі заданої маси.

Випробування макету пристрою регулювання швидкості прес-поршня машини ЛПТ дозволило здійснити регулювання швидкості з вищою точністю, що дає зниження повернення виливків на 9 %, збільшення виходу придатного на 0,3 % і продуктивності на 7,5 %.

Отже, при русі прес-поршня можна виділити три характерних ділянки: ділянка до проходження заливного вікна, ділянка розгону і ділянка постійної швидкості. На оптимальне значення моментів перемикання швидкості прес-поршня впливають маса відливки, її температура і в'язкість. Облік цих параметрів дозволяє істотно підвищити техніко-економічні показники процесу ЛПД.

## Висновки до розділу

- розроблено критерій оптимального керування машиною лиття під тиском, в основу котрого покладено коефіцієнт виходу придатного. Висунуто обмеження за параметрами процесу для оптимізації критерію з метою отримання збалансованості за такими параметрами як тривалість циклу, вихід придатного та економічна ефективність;

- запропоновано використання комбінованих дозаторів, що включають одночасно дозування пневматикою й МДН. Початок і закінчення дозування забезпечується МДН, всі інші періоди, у т.ч. зберігання металу – пневматикою. Точність дозування суттєво підвищується при введенні зворотного зв'язку по фактичній дозі залитого металу, його температурі й в'язкості. Підтримання постійної температури металу забезпечується зміною потужності на індукторах з дискретністю  $0,1 N_{\text{макс}}$  при зміні температури на  $1^{\circ}\text{C}$ , значення потужності збільшується або зменшується на 0,1. При низькій температурі металу і необхідністю заливки металу провід нагрівається перекосом потужності індукторів (потужність в одному знижується до мінімуму);

- розроблено модель теплової обробки металозагрузки в ванні ІТП та алгоритм керування температурою ІТП для включення останнього в систему керування машиною ЛПТ з метою отримання розплаву заданої температури. Розрахунки проводились виходячи з того, що лімітуюча ланка процесу – зовнішній теплообмін, протікає при початкових умовах, які враховують температуру скрапу і розплаву, їх масу, насипну щільність загрузки, яка забезпечує ефективну поверхню контакту з розплавом на границі розділу фаз, теплофізичні характеристики робочих тіл, питому потужність печі і т.д. Алгоритм прогнозування температури металу в рамках АСКТП плавки показав високу збіжність з експериментальними даними і забезпечив точність отримання розплаву заданої температури не нижче 1%. Стандартне відхилення температури металу зменшилось на  $4,7^{\circ}\text{C}$ , що дозволило значно покращити якість керування і ТЕП процесу;

- теоретичні розрахунки і експериментальні параметри температурного поля прес-форми показують, що тепловий режим об'єкта

дослідження при ритмічній роботі машини ЛПД квазіустановлений з періодично змінною теплопровідністю. В процесах акумуляції – деакумуляції теплоти бере участь тільки частина товщини прес-форми – активний шар. Розроблено пристрій регулювання температурою прес-форми, що дозволяє звузити рамки відхилення температури, а також підтримання сталої температури прес-форми в період технологічних пауз;

- дослідження схеми регулювання зусилля запирання прес-форми дозволили визначити методи контролю та керуючі впливи на процес, навести графіки та причини можливих технічних несправностей. Вимір навантажень на всіх 4 колонах машини тензорезисторними датчиками дозволив визначити не тільки загальне навантаження при запиранні прес-форми, а і ідентифікувати перекося при можливому попаднні облою в простір між рухомою та нерухомою частинами форми;

- винайдено схему та пристрій регулювання швидкості прес-поршня на всіх трьох етапах його руху, методом щілинної лінійки, що жорстко зв'язана з прес-поршнем та світлочутливих датчиків, переміщення поршня фіксується за відрахованою кількістю імпульсів. Відрізняється вищою швидкістю спрацювання та технологічною надійністю. Введення в пристрій регулювання швидкості прес-поршня машини ЛПТ коректування уставки по температурі металу і його в'язкості дозволило здійснити регулювання швидкості з вищою точністю, що привело до зниження повернення виливків на 9 %, збільшення виходу придатного на 0,3 % і продуктивності на 7,5 %;

#### 4. СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ.

Технологічний процес машини ЛПД відрізняється швидкоплинністю і циклічністю операцій, підвищеними вимогами до точності й своєчасності регламентованих керуючих діянь при отриманні відливок, різноманітням устаткування, що використовується. Передача керуючому обчислювальному комплексу (КОК) функцій автоматизації технологічного процесу значно підвищує функціональні можливості АСКТП, якість інформації, що отримана, і ефективність автоматизації процесу в цілому.

АСКТП повинна виконувати інформаційні й керуючі функції. Інформаційні функції:

- автоматичний збір і первинна обробка інформації, зокрема вимірювання параметрів, фільтрація вимірів, перевірка інформації на достовірність, масштабування;
- оперативне відображення технологічних параметрів, сигналізація про вихід параметрів за критичні межі, видача значень параметрів у АСК верхнього рівня й оператору.

Керуючі функції:

- замкнуте управління процесом, зокрема порівняння поточних значень параметрів зі заданими, визначення керуючих діянь, видача їх на виконавчі механізми, а також повне керування циклом машини по заданій циклограмі;
- замкнуте управління процесом у напівавтоматичному режимі (виконуються визначена кількість тактів керування машиною за циклограмою, для подальшої роботи необхідна команда оператора-ливарника).

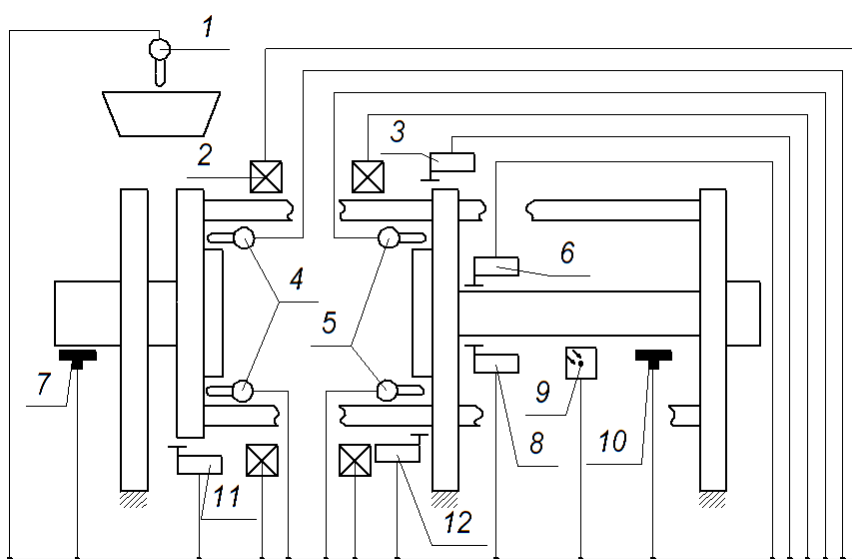
Система управління вирішує наступні задачі: термостатування сплаву в заливальній установці; розрахунок і регулювання дози сплаву; регулювання температури робочої рідини у гідросистемі, тиску робочої рідини машини ЛПД; розрахунок і регулювання тривалості кристалізації відливки й прес-залишку; контроль положення і регулювання швидкості прес-поршня при запресовці; регулювання тиску і тривалості підпресовки, змикання форми й зусилля

закривання; програмне керування циклом машини ЛПТ, маніпулятора знімання відливок й змашувальника.

#### 4.1 Інформаційна автоматична система керування

Дослідження проводились на машині АЛ711Б08. Розроблена АСК призначена для роботи в інформаційно-порадчому режимі, при якому комплекс технічних засобів в реальному масштабі часу виробляє і видає оперативному персоналу інформацію про контрольовані параметри процесу й їх вихід за межі, що визначені технологічним режимом. Такими системами доцільно оснащувати працюючі МЛПТ при відпрацюванні прес-форм і технологічних режимів пресування.

Система вирішує наступні функціональні задачі: контроль технологічних параметрів; збирання, зберігання і первинну обробку інформації; введення в систему за ініціативою оператора ливарника даних для настройки діапазонів допускаємих відхилень вимірювальних параметрів і видів браку; індикацію технологічних параметрів на засобах відображення і сигналізації про відхилення параметрів від допустимих значень. Крім того, ІАСК проводить підготовку і передачу інформації для системи верхнього рівня.



*Рис. 4.1. Структурна схема автоматизації машини ЛПТ, що оснащена інформаційно-вимірювальною системою.*

Контроль технологічних параметрів (рис. 4.1) проводиться стандартними датчиками, сигнали яких через нормуючі перетворювачі, що розміщені у спеціальному пульті оператора (13), поступали на вхід обчислювального пристрою (14). Температура у двох точках рухомої (4) й нерухомої (5) частин пресформи вимірювалась термометричними термометрами ТХК-529 серії Метран-200, температура металу в роздатковій печі – електричним термометром ТХА-0515 (1). Тиск в гідроциліндрі запирання (7) і пресування (10) вимірювався перетворювачем тиску ПДЛ-060 із сталою часу  $s \times 10^{-3}$ , зусилля натягіння кожної колони механізму запирання – силовимірювальним тензорезисторним датчиком ДСТБ-С-060 (2). Для контролю положення і швидкості прес-поршня в циліндрі пресування (9) використовується фотоелектричний датчик ДФ1-У4. Крім того, для реалізації контролю повного циклу роботи МЛПТ використовуються сигнали від кінцевих вимикачів (3, 6, 8, 11, 12): –Змикання прес-форми||, –Рух прес-форми вперед||, –Закінчення першої фази руху прес-поршня||, –Розкриття прес-форми|| і –Плита відійшла||.

Обчислювальний комплекс (ОК) побудовано на контролері типу ROC-809 з використанням номенклатурних модулів, що входять в комплект поставки, і швидкодіючого АЦП Ф-7077-1. Діалог оператора-ливарника з ОК відбувається через пульт з використанням матричного газорозрядного індикатора ІМГ-1-03. З пульта вводять інформацію про вид браку, причини відмови (несправності МЛПТ), виклик відповідних спеціалістів, стан МЛПТ, номер відливки і режим роботи системи. Відображення інформації про протікання технологічного процесу проходить за запитанням оператора-ливарника або відхиленням параметрів процесу від заданої межі контролю.

Алгоритм контролю зусилля запирання прес-форми призначено для заміру зусилля, порівняння його із заданою величиною, діагностики стану механізму запирання й подання сигналу дозволу або заборони заливання металу. Виконавчим механізмом є гідроричажний механізм запирання прес-форми. В алгоритмі реалізується непряме визначення зусилля за величиною тиску в гідроциліндрі механізму запирання. Запуск алгоритму відбувається датчиком 11 відходу рухомої плити від крайнього положення. Проводиться періодичний

запис показань датчика тиску 7 з інтервалом 0,25 с і аналізуються данні зміни параметра. Після досягнення величиною тиску заданого значення  $P$  починається опитування датчика з інтервалом 0,01...0,04 с, що продовжується до проходження пікового максимуму (приблизно 0,8...2 с). Після розпізнавання пікового тиску, відбувається його перевірка на допустимі значення. Якщо не виконується умова  $(P_3 - \Delta P) \leq P \leq (P_3 + \Delta P)$ , де  $P_3$  – задане значення пікового тиску;  $\Delta P$  – значення допустимого коливання тиску, то видається повідомлення про вихід тиску за допустимі межі. При нормальному значенні проводиться подальше опитування датчика до моменту, коли виміряна величина не зрівняється з величиною тиску у гідросистемі. При досягненні максимального тиску проводиться перевірка на спрацювання кінцевого вимикача 12 –Прес-форма зімкнута». За результатами функціонування алгоритму на табло індикатора видаються такі повідомлення: значення тиску запирання, сигнал виходу його за встановлені межі, а також про правильність запирання прес-форми (рис. 4. 2, відеокадр 1). Вихід за межі будь якого параметра позначається символом \*.

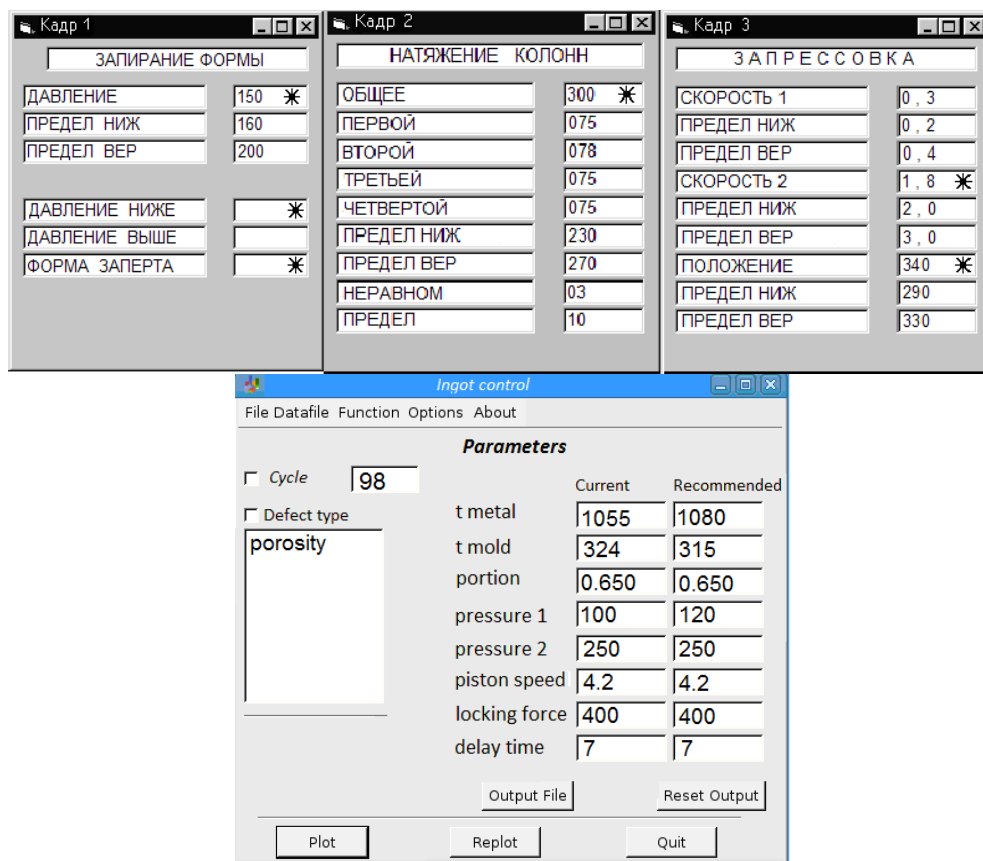


Рис. 4.2. Відеокадри з інформаційної АСК.



Після перевірки спрацювання кінцевого вимикача 12 “Плита відійшла” проводиться опитування датчиків зусиль натягу кожної половини 2 механізму запирання прес-форми. Обчислюється середнє значення зусиль натягу на одну колону  $\bar{P}$ , кН

$$\bar{P} = \sum_{j=1}^4 P_j / 4, \quad (4.1)$$

де  $P_j$  – зусилля натягу  $j$ -ї колони, кН;

$j = 1 \dots 4$  – кількість колон.

Потім визначається відносне відхилення зусилля натягу від середнього значення  $\gamma_j$ , %

$$\gamma_j = 100(P_j - \bar{P}) / \bar{P}. \quad (4.2)$$

Перевіряється умова  $|\gamma_j| \leq \gamma_m$ , де  $\gamma_m$  – задане межеве значення відхилення параметрів відповідно (рис. 4.2, відеокадр 2).

В даний час спостерігається тенденція комплексного виміру технологічних параметрів в процесі ЛПТ із записом всіх реєструємих величин на один носій, що дозволяє установити взаємозв’язок режимів і визначити їх вплив на якість відливки. Так для діагностики операції пресування в машині ЛПТ розроблено алгоритм сумісної обробки швидкості прес-поршня і тиску пресування з видачею відповідного відеокадру (рис. 4.2, відеокадр 3).

Після закінчення ливарного циклу на засоби відображення інформації видається графік зміни швидкості прес-поршня і тиску пресування, а також температури металу в роздатковій печі.

Для аналізу виробництва ЛПТ розроблені алгоритми контролю тривалості витримки виливка у прес-формі й тривалості циклу.

Під тривалістю витримки відливки береться час від початку підпресовки до моменту розкриття прес-форми. Тривалість циклу – час між двома послідовними змиканнями прес-форми з проходженням між ними операцій пресування, що гарантує виготовлення відливки. Програма запускається датчиком 11 розкриття прес-форми. По цьому сигналу проводиться запуск таймера, показання якого зчитуються при повторному спрацюванні датчика 11,

але тільки у тому випадку, якщо перед цим прийшов сигнал –Початок підпресовки». В протилежному випадку – скидання і повторне включення таймеру. Показання таймеру зчитуються при спрацюванні датчика –Плита відійшла».

За результатами функціонування алгоритму виводиться на табло значення тривалості часу витримки відливки у прес-формі й тривалості циклу, а також сигнал про вихід цих величин за допустимі межі. Кількість циклів роботи машини ЛПТ сумується і видається на табло у вигляді інформації про кількість відлитих виробів.

Алгоритм передбачає два режими роботи інформаційний з введенням даних про тип браку і без введення. Перший режим використовується при відпрацюванні технологічного режиму машини ЛПТ.

Для накопичення й обробки статистичної інформації встановлено контролер вищого рівня на базі QUANTUM. Зв'язок між контролерами проводиться по мережі Ethernet.

Розроблена інформаційна АСК МЛПТ пройшла промислову перевірку на дослідному підприємстві НДІСЛ (м. Одеса). За результатами іспитів прийняте рішення про доцільність оснащення інформаційними АСК працюючих МЛПТ при налагодженні прес-форм і технологічних режимів пресування.

#### 4.2. Багатоконтурна система керування машиною лиття під тиском

Спроектована АСКТП виконує інформаційні й керуючі функції. Інформаційні функції:

- автоматичний збір і первинна обробка інформації, зокрема вимірювання параметрів, фільтрація вимірів, перевірка інформації на достовірність, масштабування;

- оперативне відображення технологічних параметрів, сигналізація про вихід параметрів за критичні межі, видача значень параметрів у АСК верхнього рівня й оператору.

Керуючі функції:

– замкнуте управління процесом в автоматичному і у напівавтоматичному режимі (виконуються визначена кількість тактів керування машиною за циклограмою, для подальшої роботи необхідна команда оператора-ливарника).

Система управління вирішує наступні задачі: термостатування сплаву в заливальній установці; розрахунок і регулювання дози сплаву; регулювання температури робочої рідини у гідросистемі, тиску робочої рідини машини ЛПТ; розрахунок і регулювання тривалості кристалізації відливки й прес-залишку; контроль положення і регулювання швидкості прес-поршня при запресовці; регулювання тиску і тривалості підпресовки, змикання форми й зусилля закривання; програмне керування циклом машини ЛПТ, маніпулятора знімання відливки й змазчика.

У склад технічного забезпечення АСК ТП (рис. 4.5) входять прилади контролю технологічних параметрів, засоби управління виконавчими механізмами, пристрої відображення інформації про хід технологічного процесу, пульт оператора-ливарника (181), керуючий обчислювальний комплекс (182).

Регулювання температури й дози сплаву в заливальній установці (МДН) проводиться наступними засобами.

Розплавлений метал подається в машину із магнітно-динамічного насосу (МДН). Температура розплаву регулюється активною потужністю змінного струму, що підводиться до індукторів. Середня потужність на навантаженні становить

$$\bar{N}_n = \chi N_n, \quad (4.3)$$

де  $\bar{N}_n, N_n$  – відповідно середні потужності на навантаженні і прямого

підключення, кВт;

$\chi$  – коефіцієнт передачі потужності.

Діапазон і закон зміни коефіцієнта  $\chi$  залежить від способу керування виконавчим органом і його типу. Найбільш універсальними виконавчими органами є тиристори, характеристики яких дозволяють багатократно комутувати їх протягом кожного напівперіоду напруги джерела живлення. Зміна потужності на навантаженні проходить дискретно, так як тиристори виконавчого органу можуть знаходитись тільки у двох стійких станах: включеному й виключеному. Коефіцієнт передачі  $\chi$  також приймає дискретні значення. Номінальна температура металу  $t_n$  установлюється в діапазоні  $\pm 1$  °С ( $t_n$  визначається видом сплаву і відливки). При додаванні металу в МДН його температура може значно відрізнятись від номінальної. Її доведення до номінального значення проводиться за ПД законом регулювання. Зміна потужності нагрівання відбувається з дискретністю  $0,1 N_{\text{макс}}$ . Потужність нагріву кожного з двох індукторів обирається видаленням визначеного числа півхвиль живлячої синусоїди (закриття тиристора) за законом: 1 – проходження півхвилі, 0 – відсутність півхвилі (табл. 4.1).

Такий спосіб забезпечує імпульсну дискретизацію коефіцієнта  $\chi$ , при якій квантування потужності у часі йде за двома рівнями: один нульовий, другий – відповідає значенню потужності прямого підключення навантаження до мережі.

Беручи до уваги, інерційність МДН, як об'єкта регулювання температури, цикли зміни потужності організують з дискретністю 60 с. При цьому, якщо температура металу відрізняється від заданої ПД-законом регулювання більше ніж на 1 °С, значення потужності збільшується на  $0,1 N_{\text{макс}}$ , якщо метал не догрітий і зменшується, якщо перегрітий. При низькій температурі металу і необхідності його заливки в машину ЛПТ нагрівають металопровід перекошуванням потужності індукторів (в одному із індукторів потужність знижується на  $0,1 N_{\text{макс}}$ ). Внаслідок малої маси металу в метало-проводі цикл нагрівання установлюють 0,1 с.

Таблиця 4.1. Зміна потужності індуктора МДН,  $K$  (частка від  $N_{\text{макс}}$ )

Доля потужності від макс.	Положення тиристорів на тактах																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0,3	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0,4	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0,5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
0,6	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
0,7	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
0,8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Метал із МДН в машину ЛПТ подається через металопровід. Необхідний рівень металу в металопроводі підтримується тиском повітря на розплав. Напір металу забезпечується магнітодинамічною силою і надлишковим тиском стисненого повітря на розплав металу у тиглі. Для створення напору одночасно діють обидва фактори: два індуктори і електромагніт, а також подання стисненого повітря.

При необхідності заливання спочатку метал знаходиться тільки під дією електромагнітної сили, що створює напір, при цьому потужність електромагніта максимальна. По мірі зростання тиску повітря потужність, що подається в індуктори і електромагніт МДН знижується з дискретністю 0,1  $N_{\text{макс}}$ . Регулювання напору за відхиленням відбувається з урахуванням зворотного зв'язку від контактного датчика. При повному відключенні електричної потужності подальше регулювання ведеться регулюванням подачі стиснутого повітря у піч.

Після закінчення заливки миттєво знижується напір металу. Для цього одночасно включаються реверс електромагніта МДН на максимальній

потужності й клапан, що скидає тиск повітря. Електромагнітна сила, що невілює інерцію сили тиску повітря, відсікає струмінь металу. Далі по мірі падіння надлишкового тиску повітря потужність електромагніту МДН знижується ступенями по  $0,1 N_{\text{макс}}$ . Одночасно у допоміжному патрубку знижується тиск до атмосферного. Потужність електромагніта МДН знижується до нуля, а рівень металу на зрізі металопроводу підтримується тільки надлишковим тиском у тиглі. Контроль проводиться контактним датчиком.

Коректується доза за результатами заливки попередньої порції розплаву, а вимірюється за положенням прес-поршня в кінці такту підпресовки.

Температура металу в МДН і металоводі вимірюється термопарами ТХА-0515 серії Метран 200 (12 і 11), рівень металу визначається контактним рівнеміром (8), тиск повітря в металоводі – датчиком тиску серії Метран 100 ДИ (7). Наявність металу у прес-камері реєструється фотореле ФГ60-16М (10). Зміна потужності індукторів (14) і електромагніта МДН (34) проводиться тиристорами (54...57), а витрати повітря в МДН – електромагнітами (1...6).

Як зворотні зв'язки про стан устаткування використовуються контактні реле: імпульсних трансформаторів керування індукторами й електромагнітом (31...33), електромагнітних клапанів малої й великої витрати повітря в тигель (25, 26) й із нього (27, 28), електромагнітів клапанів витрати повітря у металопровід (29) й із нього 30.

Для регулювання температури прес-форми використовують термопари ТХК-529 серії Метран 200 (126...131). Нагрівачі підключаються тиристорними ключами (172...180). Клапани перемішування, подання води і повітря включаються електромагнітами (159...163). Температура рідини в термостатах вимірюється термопарами ТХК-529 серії Метран 200 (144, 145).

Як зворотні зв'язки про стан устаткування використовуються контакти реле магнітів перемішування праворуч (164) і ліворуч (165), продувки повітрям (166), подачею води у змішувач (167) і теплообмінник (168), нагрівачів (169), датчика тиску повітря (170).

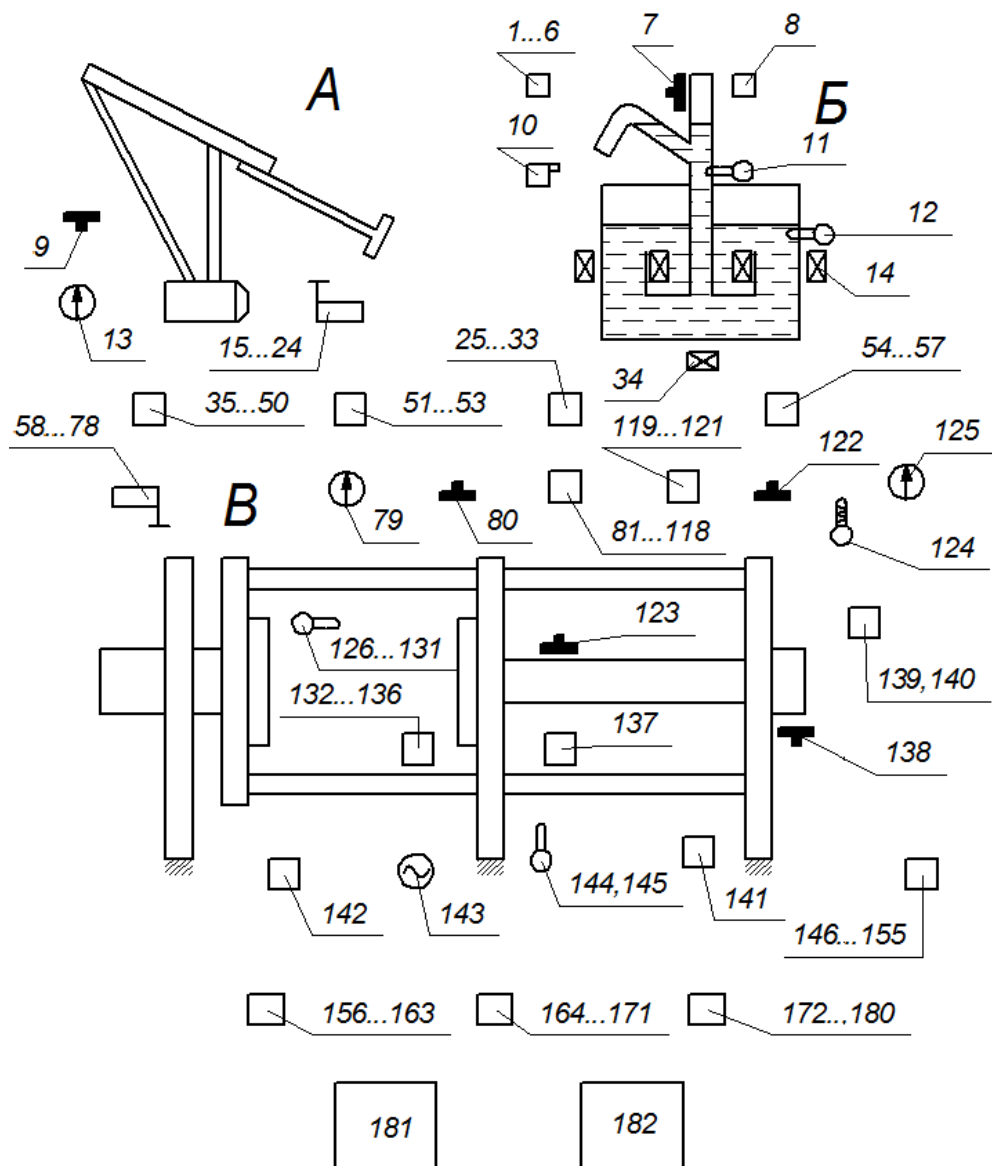


Рис. 4. 3. Структурна схема комплексу технічних засобів системи

Температура робочої рідини машини ЛПТ вимірюється термометрами опору ТСП-047 серії Метран 200 (124). Регулювання виконується електромагнітом (81), що керує охолодженням робочої рідини, й тиристорами (139, 140), що керують її нагрівом.

Як зворотні зв'язки про стан устаткування використовуються контактні реле електромагнітного клапана подання води для охолодження робочої рідини (146), насоса (147) й електромагніта включення нагрівача робочої рідини (148).

Тиск робочої рідини в гідросистемах машини, маніпулятора й змазчика вимірюється датчиком тиску серії Метран 100 ДИ (відповідно 122, 9, 80). Регулювання проводиться насосами відповідно 125 (що керуються

електромагнітами 82, 83), 13 (що керуються електромагнітами 49, 50) і 79 (що керуються електромагнітами 84 і 85).

Як зворотний зв'язок про стан устаткування, використовуються контактні реле відповідних електромагнітів відсічного клапану (51, 119, 149), включення двигуна в напрямку більше (52, 120, 150) і менше (53, 121, 151).

Для регулювання процесу запресовки в циліндрі пресування вимірюється тиск датчиком ПДЛ-060 (123) і положення прес-поршня – датчиком швидкості ФЕВ (137). Регулювання відбувається слідкуючим золотником (141). Як зворотний зв'язок про стан золотника використовуються контакти реле (171).

Для регулювання процесу підпресовки вимірюється зазор між півформами закритої прес-форми мікрометричним датчиком зусиль ДСТБ-С-060 (132), а тиск в акумуляторі підпресовки датчиком ПДЛ-060 (138). Як зворотний зв'язок про стан устаткування використовуються контакти реле слідкуючого золотника регулювання –нуль-зазору|| (152), електромагнітів швидкодіючого клапану (153), з'єднання акумулятора з насосом (154) і зливом (155).

Для регулювання натягу колон зусилля на окремі колони вимірюються датчиками ДСТБ-С-060 (133...136). Кут оберту реверсивного двигуна контролюється датчиком ФЕВ (142). Регулювання відбувається реверсивним двигуном 143, що керуються електромагнітами (157, 158).

Регулювання процесом кристалізації відбувається поданням води і повітря через клапани, що керуються електромагнітами (159, 160).

Керування циклом машини ЛПТ відбувається електромагнітами змикання (86) і розімкнення (87) плит, руху виштовхувача (88) і прес-поршня вперед (89), запресування (90), централізованої системи змащування (91) закриття дверей (94), обдування (95, 96), подання мастила (97) і повітря (98) в систему змащування, блокування змикання плит 99, повернення виштовхувача (100), змащування прес-поршня (101), повернення прес-поршня (102), відкриття дверей (103), управління змазчиком (104), уводу першого (105) і другого (106) стрижнів, виводу першого (107) і другого (108) стрижнів, номінального (109) і



максимального (110) навантаження насосу, включення відсічного клапану (111), опускання опори (112), змикання (113) і розімкнення (114) верхнього і нижнього повзунів, відсічки акумулятора (115), змикання (116) і розімкнення (117) правого і лівого повзунів, відводу стрижня (118), обертання стріли маніпулятора навкруги першої осі при прямому (35) і зворотному (36) ході, обертання стріли маніпулятора навкруги другої осі при зворотному (37) і прямому (38) ході, поступальний рух стріли вперед (39) і назад (40), розфіксація кисті (41), закриття схвату (42), прискореного руху стріли (43), важеля до машини (44) і від машини (45), згинання руки (46), фіксація кисті (47), відкриття схвату (48).

Як зворотні зв'язки про стан устаткування використовують датчики положення: плити розімкнуті (58), плити замкнуті (59), прес-поршень в початковому положенні (60), виштовхувач висунутий (61), захисні двері зачинені (62) і відкриті (63), виштовхувач у початковому положенні (64), перший стрижень введений (65) і виведений (66), другий стрижень введений (67) і виведений (68), змазчик введений (69) і виведений (70), рука у зоні прес-форми при гідровиштовхувачі в початковому (15) і виведеному положенні (16), знімач в початковому положенні (17) і в зоні прес-форми (18), початкове положення стріли відносно другої осі (19), стріла втягнута (20) і висунута (21), стріла повернута навколо першої осі при прямому ході (22) і в зворотному напрямку (23), обертання стріли навколо другої осі (24), стрижень спереду (71), опора внизу (72), зімкнуті верхній (73), нижній (74), правий (75) і лівий (76) повзуни, перешкода двері при закритті (77) і відкритті (78).

В основу технічного рішення покладено комплексний підхід до управління технологічним процесом за критерієм 3.9. Система управління (рис. 4.3) містить датчик 1 температури прес-форми, з'єднаний через обчислювальний блок 2 і регулятор 3 з виконавчим механізмом 4, що представляє собою два електромагніти, контакти яких знаходяться в ланцюзі включення відповідно термоелектронагрівача (ТЕН) і клапана подачі охолоджуючої води, причому перший електромагніт з'єднаний з виходом "Менше" регулятора 3, а другий з виходом "Більше". Датчик 5 температури

заливання металу приєднаний через регулятор 6 до виконавчого механізму 7, який представляє собою тиристиори включення індуктора для нагріву металу. Входи обчислювального блоку 8 з'єднані з датчиками температури прес-форми 1 і температури металу 5, а його вихід – з обчислювальним блоком 2 і регулятором 9 тривалості циклу роботи машини. Регулятор 9 перетворює отриманий ним сигнал в машинний код, який передається на контролер циклу. Контролер побудований на принципі жорсткої програми виконання окремих операцій процесу ЛПТ. При цьому весь технологічний цикл розбивається на такти, проходження яких для рухомих механізмів контролюється кінцевими вимикачами, а в інших випадках – за часом (наприклад, тривалість кристалізації).

Датчик 10 швидкості пресування приєднаний до обчислювального блоку 11, сполученого з датчиками 1 і 5 температури форми і заливання металу. Вихід обчислювального блоку 11 приєднаний через третій регулятор 12 до блоку 13 множення, інші входи якого з'єднані з датчиками 14 і 15 температури і тиску робочої рідини. Вихід блоку 13 множення приєднаний до виконавчого механізму 16, встановлений на магістралі зливу робочої рідини зі штокової порожнини циліндра пресування. Датчик 14 температури робочої рідини з'єднаний через регулятор 17 з виконавчим механізмом 18, який являє собою електромагніт, який включає ТЕН в разі необхідності нагріву робочої рідини або вимикає його в разі потреби її охолодження. Датчик 15 тиску робочої рідини з'єднаний через регулятор 19 з виконавчим механізмом 20 (пропорційний золотник), що встановлений в гідроприводі машини ЛПД після шестеренчастого насоса.

Датчики 21 і 22 тиску в штоковій порожнині циліндра пресування і зазору між напівформах з'єднані через обчислювальний блок 23, зв'язаний з контролером циклу і датчиком 25 тиску в акумуляторі, з виконавчим механізмом 26 (електромагнітом для включення і відключення клапана, що з'єднує регульовану порожнину акумулятора з напірною магістраллю при низькому тиску). Обчислювальний блок 23, крім того, з'єднаний через регулятор 27 з виконавчим механізмом 28 (пропорційним золотником,

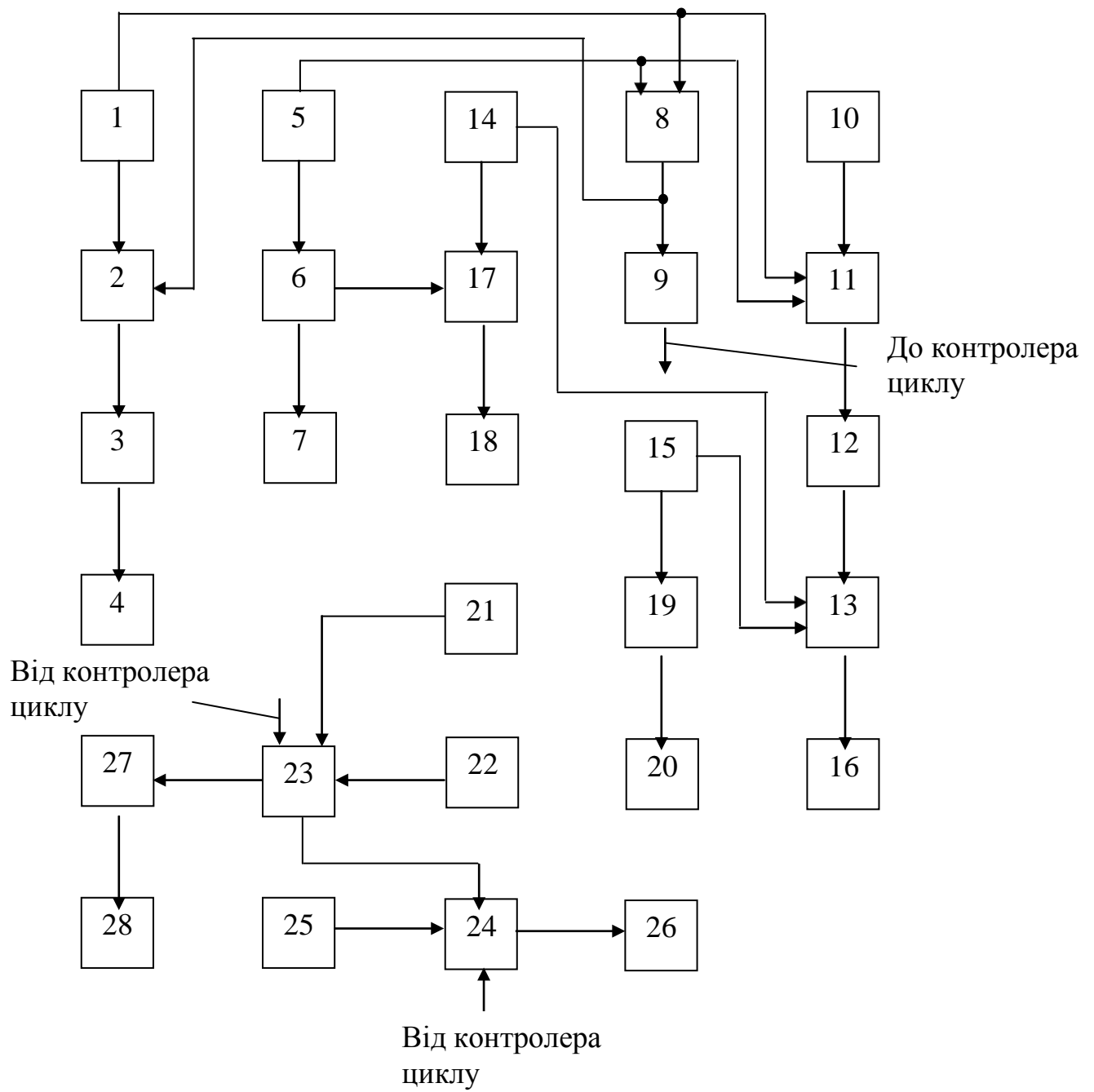


Рис. 4.3. Блок-схема системи керування машини лиття під тиском

встановленим в магістраль подачі робочої рідини в поршневу порожнину циліндра пресування).

Обчислювальний блок 2 (рис. 4.4) містить перетворювач 29, з'єднаний з суматором 30, до якого, крім того, приєднаний золотник 31. Задатчик 32 з'єднаний з суматором 33, який також з'єднаний з обчислювальним блоком 8. Вихід суматора 30 підключений через вузол 34 множення до суматора 35, до якого через вузол 36 множення підключений також суматор 33. Вихід суматора 35 є виходом обчислювального блоку 2.

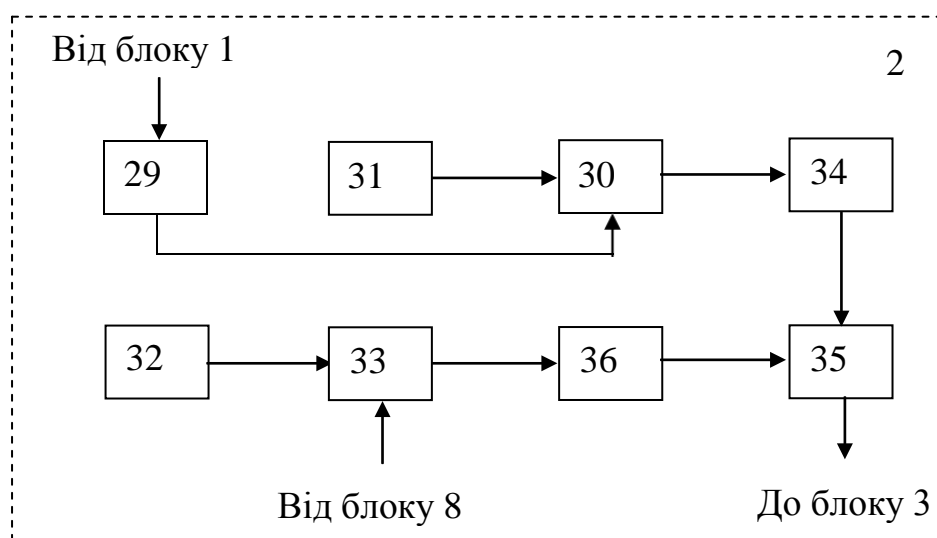


Рис. 4.4. Блок-схема обчислювального блока 2

Обчислювальний блок 8 (рис. 4.5) містить задатчик 37, який приєднаний до суматора 38, до якого, крім того, під'єднанні відповідно через вузли 39 і 40 множення перетворювачі 41 і 42, з'єднані відповідно з датчиками 1 і 5 температури прес-форми і температури металу, що заливається. Вихід суматора 38 є виходом обчислювального блоку 8.

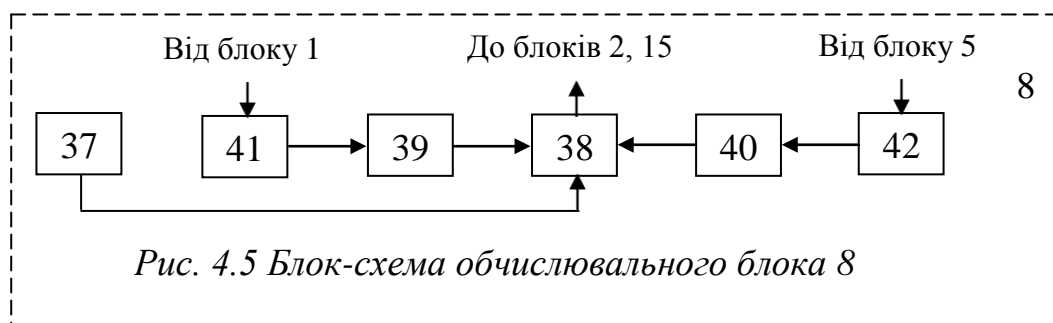


Рис. 4.5 Блок-схема обчислювального блока 8

Блок 13 множення (рис. 4.6) містить задатчики 43 номінального значення температури і 44 номінального значення тиску робочої рідини і сполучений з

датчиком 14 температури робочої рідини перетворювач 45, які під'єднані до вузла 46 множення, інші входи якого з'єднані з регулятором 12 і датчиком 15 тиску робочої рідини, а вихід є виходом блоку 13 множення.

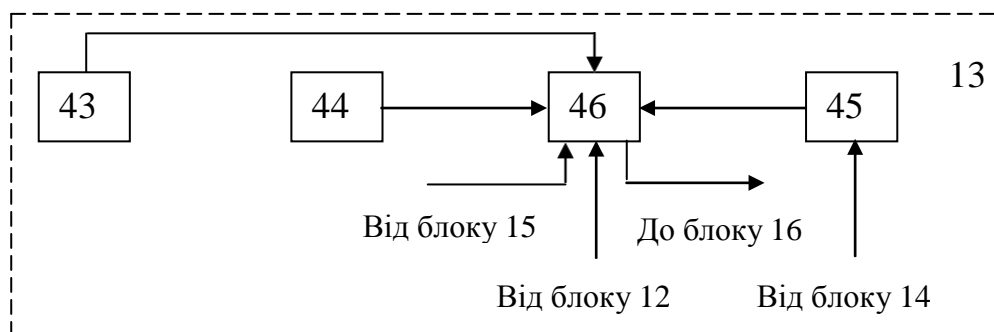


Рис. 4.6. Блок-схема блоку 13 множення

Обчислювальний блок 11 (рис. 4.7) містить п'ятий перетворювач 47, вхід якого з'єднаний з датчиком 1 температури прес-форми, а вихід з суматором 48, до другого входу якого приєднаний задатчик 49. Вихід суматора 48 приєднаний до вузла 50 множення, вихід якого з'єднаний з входом суматора 51.

Вхід перетворювача 52 з'єднаний з датчиком 5 температури металу, а його вихід – з суматором 53, до другого входу якого приєднаний задатчик 54. Вихід суматора 53 приєднаний через вузол 55 множення до суматора 51, до якого, крім того, приєднаний задатчик 56. Вихід суматора 51 приєднаний через диференціатор 57 до суматора 58, до якого, крім того, через диференціатор 59 і 60 підключений лічильник 61, з'єднаний з датчиком 10 швидкості пресування. Крім того, вихід суматора 51 через інтегратор 62 приєднаний до суматора 63, з'єданого також з лічильником 61. Вихід суматора 63 через вузол 64 множення з'єднаний з суматором 65, до якого також підключені через вузол 66 множення суматор 58 і через вузол 67 множення суматор 68. Входи суматора 68 під'єднанні до диференціатора 60 і суматора 51. Вихід суматора 51 через вузол 69 множення з'єднаний з вузлами 70 і 71 порівняння, другі входи яких, а також перший вхід суматора 72 з'єднані з виходом суматора 65. Виходи вузлів 70 і 71 порівняння з'єднані безпосередньо і через схему 73 з перемикачем 74, що містить три ключа, а саме з керуючими входами цих ключів. Відповідні керуючим входам три інформаційних входи перемикача 74 з'єднані через вузли

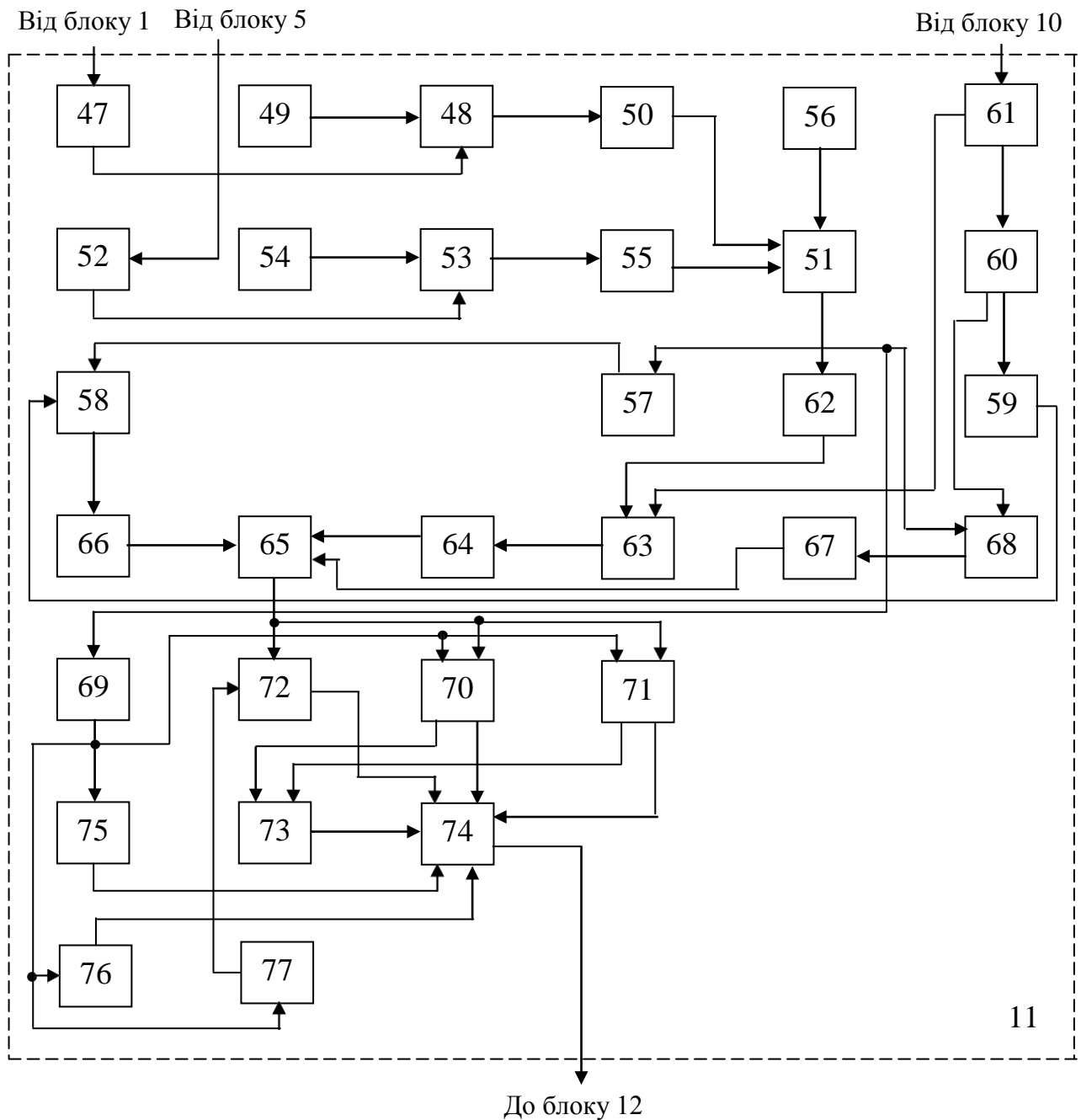


Рис. 4.7. Блок-схема обчислювального блоку 11

75 і 76 множення і через суматор 72 і вузол 77 множення з виходом вузла 69 множення. Вихід перемикача 74 є виходом обчислювального блоку 11.

Обчислювальний блок 23 (рис. 4.8) містить вузол 78 порівняння,

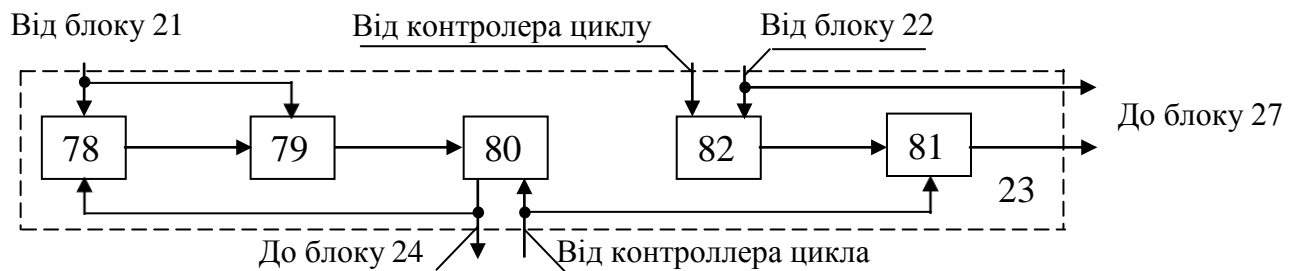


Рис. 4.8. Блок-схема обчислювального блоку 23

з'єднаний через ключ 79 з вузлом 80 пам'яті, вихід якого з'єднаний з другим входом вузла 78 порівняння. Вхід вузла 78 порівняння і другий вхід вузла 79 з'єднані з датчиком 21 тиску в штоковій порожнині циліндра пресування. Вхід вузла 81 пам'яті через ключ 82, з'єднаний з контролером циклу, під'єднанні до датчика 22 зазору між напівформами, а його вихід є другим виходом обчислювального блоку 23. Схеми скидання вузлів 80 і 81 пам'яті з'єднані між собою і з контролером циклу. Другий вихід обчислювального блоку 23 з'єднаний з датчиком 22 зазору між напівформами.

При управлінні температурою прес-форми значення керуючого струму на регулятор знаходиться у відповідності з формулою

$$I_1 = \alpha_1(t_{\text{п}} - t_{\text{п.зад}}) + \alpha_2(\tau_{\text{ц}} - \tau_{\text{цн}}), \quad (4.4)$$

де  $I_1$  – величина керуючого струму на позиційний регулятор, мА;

$t_{\text{п}}, t_{\text{п.зад}}$  – відповідно поточне і задане значення температури прес-форми,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau_{\text{ц}}, \tau_{\text{цн}}$  – відповідно поточне і нормативне значення тривалості циклу, с.

Тривалість циклу визначається за формулою

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{кр}} + \tau_{\text{д.о}}, \quad (4.5)$$

де  $\tau_{\text{кр}}$  – тривалість кристалізації виливка, с;

$\tau_{\text{д.о}}$  – тривалість інших операцій, с.

Тут

$$\tau_{\text{кр}} = \alpha_3 t_{\text{п}} + \alpha_4 t_{\text{м}} + \alpha_5, \quad (4.6)$$

де  $t_{\text{м}}$  – температура металла,  $^{\circ}\text{C}$ .

Сигнали на виходах регулятора температури прес-форми дорівнюють

$$I_{11} = 1, I_{12} = 0, \text{ якщо } I_1 > -\alpha_1 \Delta t;$$

$$I_{11} = 0, I_{12} = 0, \text{ якщо } I_1 \leq -\alpha_1 \Delta t; \quad (4.7)$$

$$I_{11} = 1, I_{12} = 1, \text{ якщо } I_1 < \alpha_1 \Delta t,$$

де  $\Delta t$  – встановлена зона можливого відхилення температури, дорівнює  $5^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_1 - \alpha_5$  – коефіцієнти, відповідно рівні  $\alpha_1 = -0,8$  мА/град;  $\alpha_2 = -0,72$  мА/с;  $\alpha_3 = 1,9 \cdot 10^{-2}$  с/град;  $\alpha_4 = 11 \cdot 10^{-3}$  с/град;  $\alpha_5 = -5 \cdot 10^{-3}$  с.

При регулюванні швидкості прес-поршня задану швидкість пресування

визначають за формулою

$$V_{\text{зад}} = \alpha_6 V_{\text{н}} + \alpha_7 (t_{\text{п}} - t_{\text{п.зад}}) + \alpha_8 (t_{\text{м}} - t_{\text{м.зад}}) + \alpha_9, \quad (4.8)$$

де  $V_{\text{зад}}$ ,  $V_{\text{н}}$  – швидкість пресування відповідно задана і номінальна, м/с;

$t_{\text{м.зад}}$  – задане значення температури металу,  $^{\circ}\text{C}$ .

При цьому керуючий сигнал, що поступає на регулятор швидкості, дорівнює

$$I_2 = \begin{cases} 0,7\alpha_{13} \cdot V_{\text{зад}} & \text{при } \Delta I_2 \leq -0,3\alpha_{13} V_{\text{зад}}; \\ 1,3\alpha_{13} V_{\text{зад}} & \text{при } \Delta I_2 > 0,3\alpha_{13} V_{\text{зад}}; \\ \alpha_{13} V_{\text{зад}} + \Delta I_2 & \text{при } -0,3\alpha_{13} V_{\text{зад}} < \Delta I_2 \leq 0,3\alpha_{13} V_{\text{зад}}; \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\Delta I_2 = \alpha_{10} \Delta S + \alpha_{11} \Delta V + \alpha_{12} \Delta a, \quad (4.10)$$

де  $\Delta S$  – відхилення від заданого значення пройденого шляху прес-поршня, м;

$\Delta V$  – відхилення від заданого значення швидкості прес-поршня, м/с;

$\Delta a$  – відхилення від заданого значення прискорення прес-поршня,  $\text{м/с}^2$ ;

$I_2$  – керуючий струм на регулятор, мА;

$\alpha_6 - \alpha_{13}$  – коефіцієнти, відповідно рівні  $\alpha_6 = 0,85$ ;  $\alpha_7 = -0,04 \text{ м/(град} \cdot \text{с)}$ ;  $\alpha_8 = -0,031 \text{ м/(град} \cdot \text{с)}$ ;  $\alpha_9 = 0,26 \text{ м/с}$ ;  $\alpha_{10} = 2 \text{ мА/м}$ ;  $\alpha_{11} = 0,1 \text{ мА/(м} \cdot \text{с}^{-1})$ ;  $\alpha_{12} = 20 \cdot 10^{-4} \text{ мА/(м} \cdot \text{с}^{-2})$ ;  $\alpha_{13} = 20 \text{ мА/(м} \cdot \text{с}^{-1})$ .

Керуючий сигнал, що поступає на виконавчий механізм регулювання швидкості прес-поршня, визначається за формулою

$$I_{21} = I_2 \cdot \frac{t_{\text{ж}}}{t_{\text{ж.н}}} \cdot \frac{P_{\text{ж}}}{P_{\text{ж.н}}}, \quad (4.11)$$

де  $t_{\text{ж}}$ ,  $t_{\text{ж.н}}$  – відповідно поточне і номінальне значення температури робочої рідини,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$P_{\text{ж}}$ ,  $P_{\text{ж.н}}$  – відповідно поточне і номінальне значення тиску робочої рідини, МПа.

Керуючі впливи на інші виконавчі механізми пропорційні: при регулюванні температури металу – відхиленню температури від заданої, при регулюванні температури робочої рідини – відхиленню температури від



заданої, при регулюванні тиску робочої рідини – відхиленню тиску від заданого, при регулюванні тиску зарядки акумулятора – відхиленню від пікового тиску підпресовки, при регулюванні процесу підпресовки – відхиленню величини зазору між напівформами від заданої.

Система працює таким чином. У процесі циклу виробництва виливка вимірюють температуру прес-форми за допомогою датчика 1, встановленого в отвір прес-форми на відстані 0,5 мм від внутрішньої поверхні. Виміряна напруга надходить в обчислювальний блок 2, в який одночасно надходить напруга, з обчислювального блоку 8, пропорційна тривалості циклу. У обчислювальному блоці 2 визначається сигнал  $I_1$  на регулятор 3 за формулою (4.1). Регулятор 3 генерує керуючі сигнали на виконавчий механізм 4, який включає подачу нагрітої робочої рідини в канали прес-форми, в разі потреби її нагрівання, або на подачу води для охолодження робочої рідини, що подається в канали прес-форми, у разі необхідності її охолодження.

Температуру металу, що заливається, вимірюють датчиком 5, змонтованим в печі для нагріву металу. Вимірювана напруга поступає на другий регулятор 6, з виходу якого керуючий сигнал подається на виконавчий механізм 7.

Температуру робочої рідини вимірюють датчиком 14, вихідний сигнал якого надходить на регулятор 17. Вихідний сигнал регулятора подається на виконавчий механізм 18, який включає ТЕН в разі потреби нагріву робочої рідини або вимикає його в разі потреби її охолодження.

Сигнали від датчиків 1 і 5 температури прес-форми й металу надходять в обчислювальний блок 8, в якому обчислюється тривалість циклу за формулами (4.2) і (4.3). Сигнал з виходу обчислювального блоку 8 через регулятор 9 тривалості циклу надходить на контролер циклу, в якому при цьому змінюється уставка тривалості кристалізації виливка.

Швидкість пресування вимірюють датчиком 10. Сигнал, що пропорційний швидкості пресування, надходить в обчислювальний блок 11, в який одночасно надходять сигнали з датчиків 1 і 5 температури прес-форми і температури металу. У обчислювальному блоці 11 відповідно до формул (4.5) –

(4.7) визначається керуючий сигнал  $I_2$  на регулятор 12, з виходу якого сигнал, пропорційний цій величині, надходить на вхід блоку 13 множення, на інші входи якого поступають сигнали, пропорційні температурі і тиску робочої рідини. У блоці 13 множення за формулою (4.8) проводиться визначення керуючого сигналу  $I_{21}$ , що надходить на виконавчий механізм 16, який в залежності від величини цього сигналу регулює злив робочої рідини зі штокової порожнини циліндра пресування, змінюючи тим самим швидкість пресування.

Тиск робочої рідини вимірюється датчиком 15, вихідний сигнал якого надходить на регулятор 19. Вихідна напруга регулятора 19 надходить на виконавчий механізм 20, який в залежності від величини напруги регулює кількість робочої рідини, що потрапляє в магістраль і на зливання.

Напруга, що пропорційна тиску в штоковій порожнині циліндра пресування, виміряна датчиком 21, надходить в обчислювальний блок 23. Туди ж надходить напруга з датчика зазору між напівформами прес-форми. У обчислювальному блоці 23 проводиться визначення пікового (максимального) тиску підпресування, і напруга, пропорційна його величині, надходить з першого виходу обчислювального блоку 23 в регулятор 24, з'єднаний, крім того, з датчиком 25 тиску в акумуляторі. Вихідна напруга регулятора 24 надходить на виконавчий механізм 26, що змінює тиск в акумуляторі. Регулювання тиску в акумуляторі проводиться в перервах між циклами по сигналу від контролера циклу.

Крім того, з другого виходу обчислювального блоку 23 на регулятор 27 надходять сигнали, пропорційні поточному значенню зазору між напівформами і значенням зазору в момент змикання плит. Вихідний сигнал регулятора 27 надходить на виконавчий механізм 28, за допомогою якого регулюється величина зазору між напівформами прес-форми.

Напруга, що пропорційна температурі прес-форми, перетворюється перетворювачем 29 в сигнал, що надходить на суматор 30, в який одночасно надходить сигнал, пропорційний величині заданої температури прес-форми, з датчика 31. Вихідний сигнал з суматора 30, пропорційний відхиленню

температури прес-форми від заданого значення, надходить у вузол 34 множення, з виходу якого сигнал, надходить на суматор 35. Сигнал, пропорційний тривалості циклу, з обчислювального блоку 8 надходить на суматор 33, в який одночасно надходить сигнал, пропорційний заданій тривалості циклу, зі задатчика 32. Вихідний сигнал суматора 33, пропорційний відхиленню тривалості циклу від заданого значення, надходить на вузол 36 множення, вихідний сигнал якого пропорційний величині  $\alpha_2(\tau_{\text{ц}} - \tau_{\text{цн}})$ , надходить на суматор 35. Таким чином, вихідний сигнал суматора 35 є керуючим сигналом на регулятор 3 температури прес-форми.

Вихідний сигнал зі задатчика 37, пропорційний тривалості циклу за вирахуванням тривалості кристалізації виливка, надходить на суматор 38. Напруга, пропорційна температурі прес-форми, через перетворювач 41 (у якому перетворюється в уніфікований сигнал) надходить на вузол 39 множення, вихідний сигнал якого пропорційний величині  $\alpha_3 t_{\text{п}}$ .

Напруга, що пропорційна температурі металу, через перетворювач 42 (у якому перетворюється в уніфікований сигнал, надходить в вузол 40 множення, вихідний сигнал якого пропорційний величині вихідного сигналу вузлів 39 і 40 множення надходить в суматор 38, в якому визначається тривалість циклу відповідно до формулами (4.2) і (4.3).

Сигнали, що пропорційні номінальним значенням температури робочої рідини й її тиску, надходять відповідно з датчиків 43 і 44 у вузол 46 множення, в який одночасно надходять сигнали про температуру робочої рідини (через перетворювач 45), тиск робочої рідини і сигнал, пропорційний  $I_2$ . У вузлі 46 множення розраховується керуючий сигнал  $I_{21}$  на виконавчий механізм 16 відповідно до формули (4.8). Напруга з датчика 1 температури прес-форми перетворюється в уніфікований сигнал в перетворювачі 47 і надходить на суматор 48, в який одночасно надходить сигнал про задане значення температури прес-форми зі задатчика 49. З виходу суматора 48 сигнал, пропорційний  $(t_{\text{п}} - t_{\text{п.зад}})$ , надходить на вузол 50 множення, вихідний сигнал якого пропорційний  $\alpha_7(t_{\text{п}} - t_{\text{п.зад}})$ . Напруга з датчика 5 температури

металу перетворюється в уніфікований сигнал в перетворювачі 52 і надходить на суматор 53, в який одночасно надходить сигнал про задане значення температури металу, що заливається, з датчика 54. З виходу суматора 53 сигнал, пропорційний  $(t_m - t_{m.зад})$ , надходить на вузол 55 множення, вихідний сигнал якого пропорційний  $\alpha_8(t_m - t_{m.зад})$ . Вихідні сигнали вузлів 50 і 55 множення і датчика 56 номінальної швидкості пресування надходять на суматор 51, вихідний сигнал якого пропорційний  $V_{зад}$  відповідно до формули (4.5). Восьмий датчик 56 є програмним датчиком номінальної швидкості пресування, що змінюється по ходу пресування. Вихідний сигнал суматора 51 надходить в диференціатор 57, вихідний сигнал якого пропорційний величині заданого прискорення, а також на інтегратор 62, вихідний сигнал якого пропорційний величині заданого шляху, пройденого прес-поршнем. Вихідний сигнал датчика 10 швидкості пресування у вигляді кількості імпульсів в одиницю часу надходить у вузол 61 визначення шляху, сигнал з вихідного перетворювача якого надходить в суматор 63, в який одночасно надходить сигнал від інтегратора 62. Вихідний сигнал суматора 63, пропорційний величині  $\Delta S$ , надходить у вузол 64 множення. Крім того, сигнал з виходу вузла 61 визначення шляху надходить на диференціатор 60, вихідний сигнал якого пропорційний поточній швидкості пресування, надходить на суматор 68, в який одночасно надходить сигнал з суматора 51. З виходу суматора 68 сигнал, пропорційний величині  $\Delta V$ , надходить на вузол 67 множення. Крім того, вихідний сигнал диференціатора 60 надходить на диференціатор 59, вихідний сигнал якого, пропорційний величині  $\Delta a$ , надходить на вузол 66 множення. Вихідні сигнали з вузлів 64, 66 і 67 множення, пропорційні відповідно  $\alpha_{10}\Delta S$ ,  $\alpha_{12}\Delta a$  і  $\alpha_{11}\Delta V$ , надходять на суматор 65, вихідний сигнал якого пропорційний величині  $\Delta I_2$ , визначається за формулою (4.7). Вихідний сигнал з суматора 51 надходить у вузол 69 множення, в якому обчислюється величина  $0,3\alpha_{13}V_{зад}$ . Сигнал з виходу вузла 69 множення надходить на 75 і 76 вузли множення, вихідні сигнали яких, пропорційні  $0,7\alpha_{13}V_{зад}$  і  $1,3\alpha_{13}V_{зад}$ , і через вузол 77

множення на суматор 72, з'єднаний також з суматором 65. Вихідний сигнал суматора 72 пропорційний величині  $\alpha_{13} V_{\text{зад}} + \Delta I_2$ . Крім того, сигнал з виходу вузла 69 множення надходить на вузли 70 і 71 порівняння, з'єднані також з суматором 65. При виконанні умови на виході вузла 70 порівняння з'являється одиничний сигнал, який в перемикачі 74 включає ключ, що комутує ланцюг зв'язку вузла 75 множення з регулятором 12. При виконанні умови на виході вузла 71 порівняння з'являється одиничний сигнал, який в перемикачі 74 включає ключ, що комутує ланцюг зв'язку вузла 76 множення з регулятором 12. При виконанні умови нульові сигнали з виходів вузлів 70 і 71 порівняння надходять в схему 73, на виході якої з'являється одиничний сигнал, що включає в перемикачі 74 ключ, що комутує ланцюг зв'язку суматора 72 з регулятором 11. Таким чином, з виходу перемикача 74 знімається сигнал, пропорційний величині  $I_2$ .

У процесі пресування сигнал, що пропорційний величині тиску в поршневій порожнині циліндра пресування, надходить у вузол 78 порівняння, на другий вхід якого надходить нульовий сигнал з вузла 80 пам'яті. При цьому одиничний сигнал з виходу вузла 78 порівняння включає ключ 79, який комутує ланцюг: датчик 21 тиску в штоковій порожнині циліндра пресування – вузол 80 пам'яті. Сигнал, пропорційний величині тиску, записується у вузол 80 пам'яті. Надалі при зменшенні сигналу ключ 79 замикається і нові значення у вузол пам'яті не записуються. Таким чином, у вузлі 80 пам'яті записується максимальне значення тиску в поршневій порожнині циліндра пресування.

Сигнал про змикання прес-форми надходить від контролера циклу на ключ 82, відкриваючи ключ і записуючи у вузол 81 пам'яті сигнал, пропорційний початковому зазору між напівформами прес-форми в момент змикання. У процесі пресування регулятор 27 проводить регулювання зазору по величині відхилення його поточного значення від заданого. Скидання вузлів 80 і 81 пам'яті здійснюється за сигналом про початок циклу від контролера циклу.

Регулювання змикання прес-форми та зусилля запирання здійснюється за показниками датчиків зусилля, встановлених в кожній з 4-х колон. Після

змикання пів форм шляхом дискретного опитування здійснюється контроль та порівняння з заданим значенням величини зусилля запирання кожної  $j$ - колони

$$|P_y/4 - P_j| < \Delta P \quad (4.12)$$

де  $P_y$  – уставка зусилля запирання в прес формі, кН;  $P_j$  – зусилля натягнення кожної колони ( $j=4$ );  $\Delta P$  – уставка величини відхилення зусилля натягнення однієї колони, кН.

Якщо в результаті контролю зусилля натягнення будь-якої з колон виходить за допустимі межі, натягування цієї колони регулюється при відкритій прес формі обертанням реверсивного електродвигуна на один крок, що визначається числом імпульсів від фотоелектричного датчика, встановленого на осі двигуна. Далі виконується аналіз відсутності послідовних регулювань в різні сторони і більше 4-х регулювань в одну сторону, а також знаходження прес форми в одному з крайніх положень. В усіх цих випадках блокується цикл машини ЛПТ і видається інформація про причини блокування.

Після зміни прес форми визначається відстань на яку необхідно пере двинути форму в нове положення

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (4.13)$$

де  $\Delta h$  – хід прес-форми, мм;  $h_1$  і  $h_2$  – висоти відповідно робочої та попередньої прес-форми.

Після аналізу знаку  $\Delta h$  відповідно вмикається електричний двигун. Обчислюється число імпульсів  $n$ , що відповідають відстані  $\Delta h$  з округленням до найближчого цілого числа

$$n = \Delta h / \gamma \quad (4.14)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт пропорційності, мм/імп.

Після того як кількість імпульсів, отриманих від датчика стане рівним розрахунковому значенню  $n$ , регулятор зупиняє обертання електродвигуна.

Вимірювання параметрів проводиться стандартними датчиками ГСП: температури прес-форми – термопарою ТХК-0529, температури металу, що заливається – термопарою ТХА-515, температури робочої рідини – термометром опору ТСП-047, швидкості пресування – фотоелектричним

датчиком ДФ1 - У4 [31], тиску робочої рідини і в акумуляторі – перетворювачами Метран - 100ДИ [20], тиску в штоковій порожнині циліндра пресування – перетворювачем ПДЛ-60 [26], зазору в прес-формі датчиком зусилля ДСТБ -С- 060 [37]. Регулятори, блоки та вузли виконані на базі системи АКЕСР і мікросхемах обчислювальної техніки. Випробування системи управління машиною ЛПТ показало, що використання системи дозволяє здійснити регулювання з вищою точністю, що приводить до збільшення продуктивності за рахунок зниження повернення виливків на 15 %, збільшення виходу придатного на 0,5 %.

#### 4.3. Управління білямашинами операціями комплексу ЛПТ

Промислові роботи в АСКТП комплексу ЛПТ виконують транспортні й технологічні операції. Транспортні операції: видалення виливка із прес-форми, перенос виливка до пристрою контролю повноти вилучення, доставка виливка на стенд контролю, укладання виливка у штамп пресу, завантаження виливка у тару або на конвейєр. Технологічні операції: очищення і змащення прес- форми з допомогою пристроїв, що установлені на руці робота, установка арматури у прес-форму, охолодження виливка в ємності з водою або під розпилинем струменем води.

Найбільш широке розповсюдження отримали автоматичні маніпулятори для знімання виливків, що виконані у вигляді механічної руки із захоплювачем і працюють від контролера за постійною програмою, що задає жорсткий цикл роботи маніпулятора [112]. Недоліком цих маніпуляторів є обмеженість їх функціональних можливостей, зокрема незмінність операцій при вилученні як нормальних, так і бракованих виливків, тобто відсутність автоматичного сортування.

В автоматичній лінії АЛ7111М використовують маніпулятор з механічним захватом, що працює від програмного контролера, і виконує наступні операції: вилучення виливка; її охолодження з одночасним виміром об'єму (якщо об'єм виливка менше розрахункового, то вона зразу переноситься у тару браку);

зважування виливка; рентгеноскопію; обрубку ливників і облою; передача відливки на укладальник продукції. Однак у випадку неповного вилучення із багатомісної прес-форми виливка помилково визнається бракованою.

Нами досліджено зв'язок між технологічними параметрами роботи устаткування в процесі лиття під тиском і повнотою вилучення виливка із прес-форми з метою підвищення продуктивності роботи машини ЛПТ.

Знаючи діаметр камери пресування і вимірюючи довжину прес-залишку, можна визначити фактичну масу останнього за формулою

$$m_3 = \rho \pi d^2 L / 4, \quad (4.15)$$

де  $m_3$  – маса прес-залишку, кг;

$\rho$  – густина металу, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – діаметр камери пресування, м;

$L$  – довжина прес-залишку, м.



З іншого боку, при повному заповненні металом порожнини прес-форми задана маса прес-залишку

$$m_{зд} = m_d - \rho V, \quad (4.16)$$

де  $m_{зд}$  – задана маса прес-залишку, кг;

$m_d$  – маса дози металу, кг;

$V$  – сумарний об'єм відливки, промивників і ливникової системи (для відливки визначеного виду величина постійна), м<sup>3</sup>.

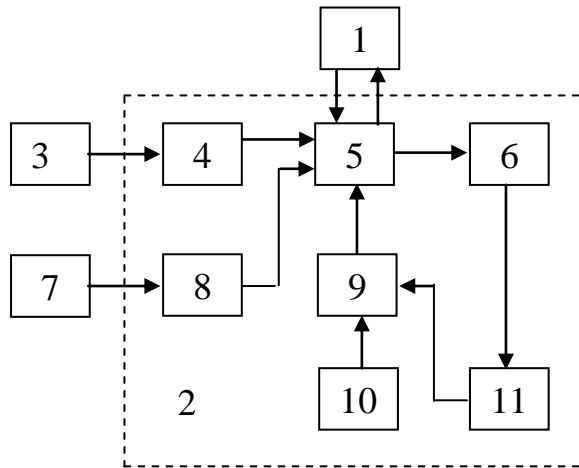


Рис. 4.9. Структурна схема пристрою управління промисловим роботом

Якщо  $m_z > m_{зд}$ , відливка вважається бракованою. Датчик об'єму використовується для контролю повноти відливки, яка визначена як небракована. Цей контроль необхідний для урахування можливості виплеску металу із роз'єму прес-форми.

Пристрій управління (рис. 4.9) складається з програмного контролера 2, що вміщує модулі мікропроцесора 5, вводу аналогових 4, дискретних 9, число- імпульсних 8 сигналів і виводу дискретних сигналів 6. Контролер 2 з'єднаний з системою управління циклом машини ЛПТ 1, виконавчим механізмом маніпулятора 11 з механічним затискачем типу РМ-2, що має безконтактні датчики положення механічних вузлів БТП 101-24. Маніпулятор 11 також вміщує безконтактні датчики положення механічних частин. Контролер 2 з'єднаний з датчиками об'єму вилівка 10, маси дозуємого металу 3 і довжини прес-залишку 7. Датчик 10 виконаний як контактний електрод, датчик 3 – тензометричний перетворювач типу ДСТБ-С-060 [38], що змонтований на заливальному пристрої, а датчик 7 – вимірювач положення прес-поршня [26] у вигляді щілинної лінійки, що жорстко з'єднана із штоком поршня, з вихідним пристроєм у вигляді вимикача імпульсів.

Промислові іспити макета, який реалізує технічне рішення по управлінню роботом, показали, що внаслідок скорочення тривалості визначення браку

відливки, зменшення зносу і відмов устаткування підвищується на 5 % продуктивність комплексу ЛПТ.

Для контролю повноти вилучення виливка використовуються електромеханічні, струмені, інфрачервоні й вагові пристрої [39]. Пристрої перших трьох типів можуть установлюватися на руці робота або автономно поряд з машиною. Вони реагують тільки на кількість вилучених виливків і не враховують їх цілісності. Вагові пристрої автономні й звичайно використовуються у АСК, що не оснащені промисловими роботами. Пристрої, що розміщені на руці робота, менш інерційні. Вагові пристрої, незважаючи на більшу інерційність, дозволяють найбільш точно контролювати повноту вилучення виливка.

Нами розроблена система управління машиною ЛПТ, яка включає практично безінерційний контроль повноти вилучення виливка [40]. Повнота вилучення виливка чи групи виливків визначається характером реакції датчиків присутності виливка на збурення, що виникає при охолодженні напівформ при їх обдуванні й змащуванні. Працеспроможність датчиків контролюється за зміною їх сигналів в процесі заповнення прес-форми металом. Датчиками слугують термопары ТХК-0529, що встановлені у спеціальних отворах прес- форми. Гарячі спаї термопар розташовані на відстані 0,5...0,6 мм від контактної поверхні, так як у момент впуску металу основне теплове навантаження несе тонкий шар прес-форми. У випадку неповного вилучення відливки залишкова її частина або вся відливка сприймає на себе основне теплове навантаження й падіння температури в місці установки відповідного датчика присутності відливки різко зменшується.

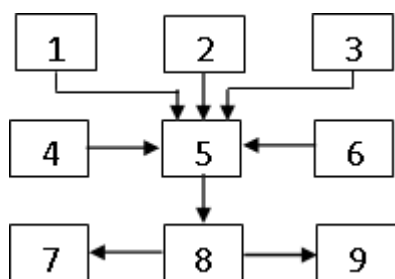


Рис. 4.10. Структурна схема системи управління машиною ЛПТ

Система керування машиною ЛПТ працює наступним чином (рис. 4.10).

При закінченні процесу кристалізації блоком управління 8 (мікропроцесор серії К-1-20) видаються команди на електромагніти, що управляють приводом розімкнення прес-форми, після чого вводиться маніпулятор 7 в її

роз'єм.

Маніпулятор захоплює відливку, виводить її з роз'єму прес-форми і повертається в початковий стан, після чого в роз'єм форми вводиться маніпулятор 9. Блоком 8 включаються електромагніти обдування повітрям і змащуванням прес-форми, при спрацюванні яких замикається позиційний контакт датчика початку обдування і змащування 6 внутрішньої поверхні форми. Датчик 6 формує ініціативний сигнал, що поступає в блок контролю вилучення відливки (мікропроцесор серії К-1-20).

На початку заповнення металом прес-форми спрацьовує датчик 4 початку заповнення металом (реле тиску), що виробляє ініціативний сигнал. По цьому сигналу проводиться опитування датчиків присутності відливок 1...3 і запом'ятовується показання кожного з них. Після витримки 0,5 с проводиться повторне опитування датчиків і порівняння їх показань з виміряними раніше. Якщо показання датчиків зросли, блок 5 готовий до роботи, в протилежному випадку видається повідомлення про несправність датчиків присутності виливка.

При отриманні сигналу від датчика початку обдування й змащування прес-форми 6 проводиться опитування датчиків присутності виливків 1 – 3 і запом'ятовування показань кожного датчика. Після витримки 2 с – повторне опитування датчиків і порівняння їх показань з виміряними раніше. При нормальному охолодженні характерного місця (зниження температури повинно перевищувати 10 °С) проводяться наступні операції на ливарній машині (закінчення змащування й повернення маніпулятора у початковий стан). При повільному охолодженні характерного місця прес-форми, що свідчить про неповне вилучення відливки, в блок 8 подається сигнал про зупинку процесу.

Для автоматизації процесу змащування прес-форми використовують пристрої, що відрізняються як способом нанесення мастила, так і конструктивним виконанням. За способом нанесення пристрої поділяються на дві групи: для змащування відкритої й закритої прес-форми. За конструктивним виконанням пристрої для змащування відкритої прес-форми поділяються на пристрої зі стаціонарно розташованими форсунками і пристрої із рухомим

блоком форсунок, які, в свою чергу, можуть бути виконані з одно- і двокоординатним переміщенням. Блок форсунок звичайно встановлюють на руці маніпулятора.

Змащування прес-форми у закритому стані – новий спосіб, що розроблений з метою захисту навколишнього середовища від забруднення, зменшення втрат змащувального матеріалу і покращення умов праці. Цей спосіб дозволяє наносити мастило на складні поверхні, глибоко розташовані у формі, не використовуючи маніпуляторів. Однак цей спосіб поки не знайшов широкого використання.

Таким чином основним способом є змащування прес-форми у відкритому стані. Для цього машини ЛПТ оснащені як стаціонарними форсунками, так і маніпуляторами з рухомим блоком форсунок. Управляються маніпулятори мікропроцесора управління циклом машини.

Промислові іспити системи управління машини ЛПТ на дослідному заводі НПО НДІСЛ (м. Одеса) показало, що використання системи знижує повернення виливків на 5 %, підвищує вихід корисного на 0,2 % і продуктивність агрегату на 10 %.

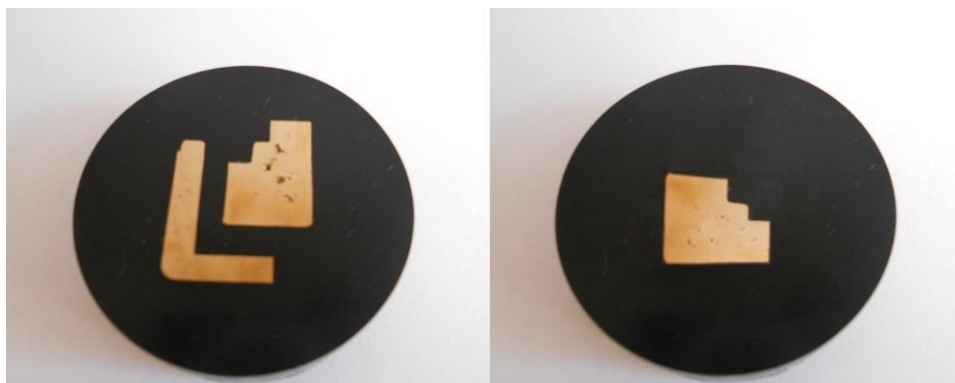
#### 4.4. Дослідження структури та хімічного складу отриманих зразків та економічної ефективності

Для дослідження макро та мікроструктури були вирізані зразки масивного та тонкого перерізу з однакових частин ідентичних зразків з роботою АСКТП та без неї.



*Рис. 4.11. Розташування місць відбору проб для макро та мікроаналізу.*

При аналізі макроструктури було виявлено значне покращення внутрішньої структури виливка в масивній частині перерізу після впровадження автоматизації.

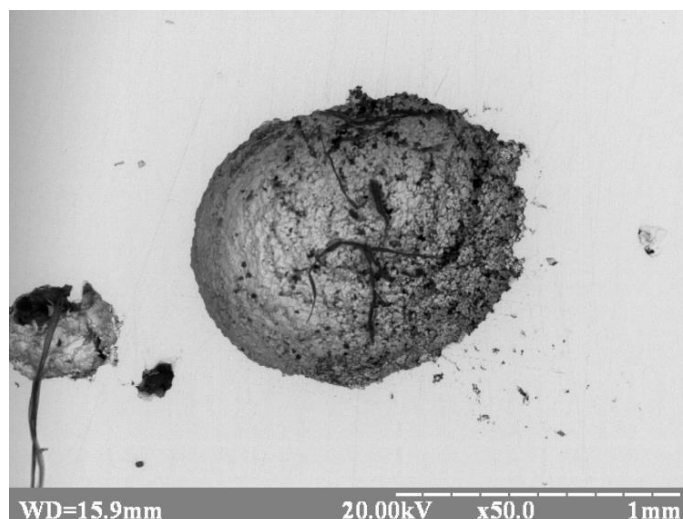


*Рис. 4.12. Аналіз макроструктури виливків без АСКТП (ліворуч) та з автоматизацією процесу (праворуч).*

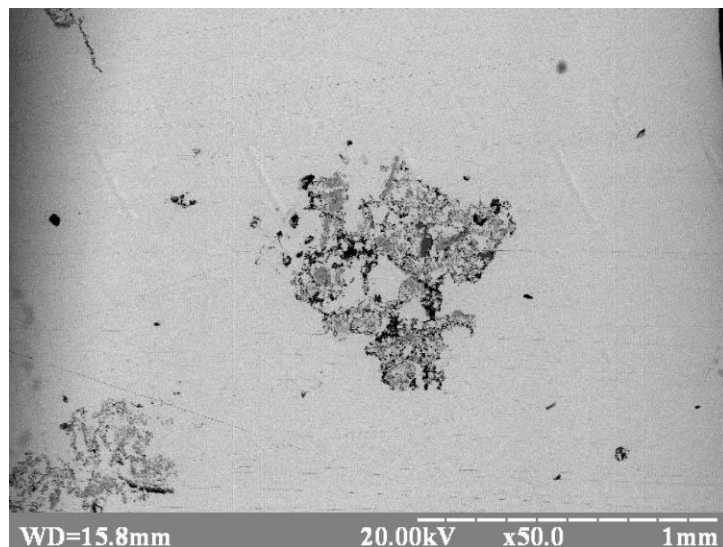
Аналіз мікроструктури проводився на електронно-скануючому емісійному мікроскопі ЕДАР, в лабораторії матеріалознавства НТУУ «КПІ». З його допомогою були отримані фотографії шліфів збільшенням від 50 до 2500 разів та точковий хімічний аналіз при згаданих збільшеннях, отриманих з виливків без впровадження АСКТП та після нього.

При дослідженні мікроструктури отриманих зразків були отримані наступні результати:

Розподілення газової пористості у виливках, виготовлених з використанням системи більш рівномірне та дрібнодисперсне ніж без системи (50-кратне збільшення).

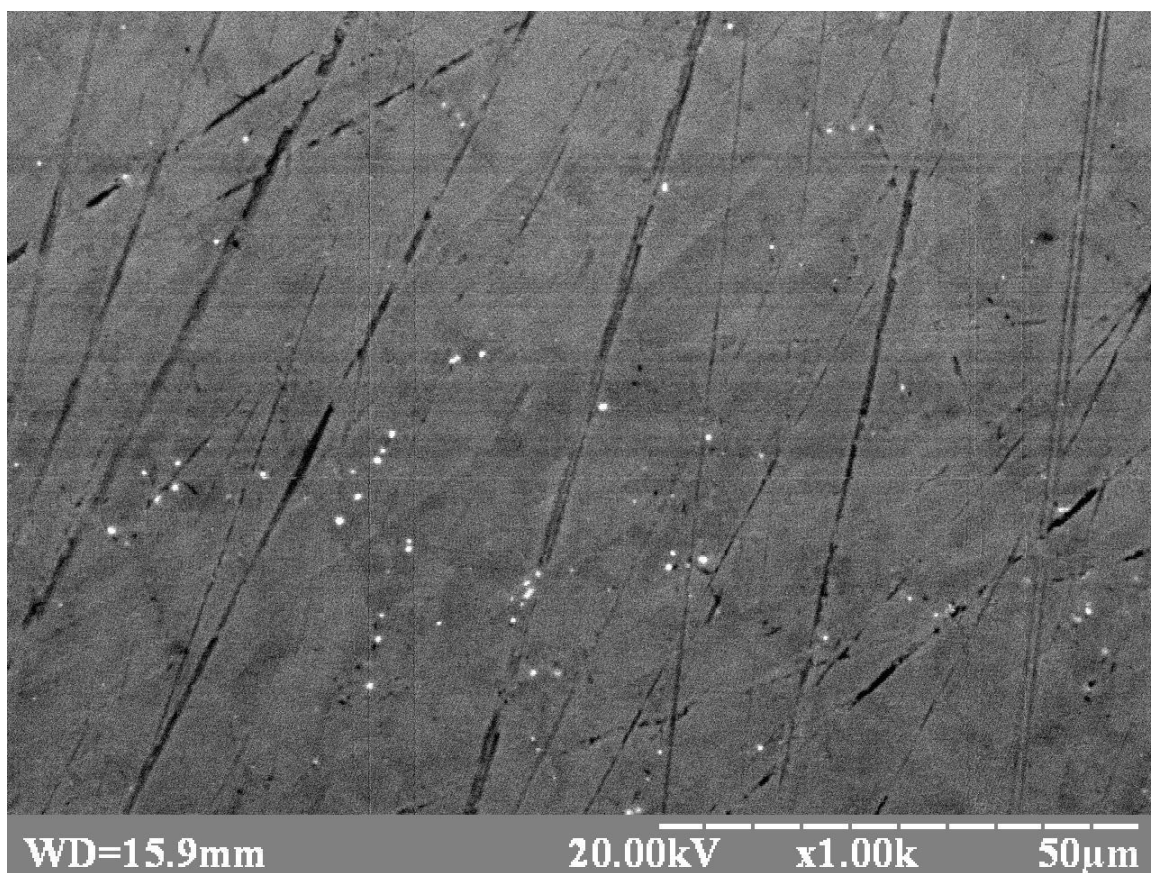


*Рис. 4.13. Виливок без системи*



*Рис. 4.14. Виливок з системою.*

При цьому розподілення свинцю в товщі металу було практично однакове, та рівномірне.



*Рис.4.15. Металева матриця зразків (збільшення 1000 разів).*

Світлі крапки на фото, включення свинцю, який хімічно не реагує з компонентами сплаву, та залишається в твердому стані у вигляді певних угруповань розміром 0,5 – 2 мкм.

Хімічний аналіз виявив значне відхилення складу латуні від ГОСТ 1020.

Заявлений матеріал заводом - латунь ЛЦ40Сд, а по факту це латунь ЛК2 з значним вмістом свинцю. Це свідчить про невиконання норм вхідного контролю на підприємстві, та низьку якість сировини.

Табл. 4.2. Типовий хімічний склад отриманих зразків

Елемент	Мас. доля, %	ЛК2	ЛК	ЛКС
		ГОСТ 1020		
14Si	2.195±0.086	1.90-2.80	2.80-4.50	2.50-4.50
15P	0.041±0.017	0.00-0.10	0.00-0.10	0.00-0.10
26Fe	0.221±0.016	0.00-0.60	0.00-0.60	0.00-0.60
28Ni	0.043±0.011	0.00-0.20	0.00-0.20	0.00-0.20
29Cu	75.902±0.114	основа	основа	основа
30Zn	21.137±0.090	13.50-22.10	11.80-21.20	8.30-19.50
50Sn	0.167±0.021	0.00-0.30	0.00-0.30	0.00-0.30
82Pb	0.294±0.023	0.00-0.50	0.00-0.50	2.00-4.00

Було проведено теоретичний розрахунок економічної доцільності виходячи з розрахунку потужності цеху 100 тонн готових виливків на рік.

Річний прибуток:

$$\Pi = (\Pi - C) * B \quad (4.15)$$

де  $\Pi$  - прибуток, грн. ;

$\Pi$  - ціна продукції, грн. / т. ;

$C$  - собівартість продукції, грн. / т. ;

$B$  - кількість продукції, що випускається на рік, т.

$$\Pi = (98000 - 82953) * 100 = 1504652 \text{ грн.}$$

З вирахуванням податку на додану вартість

$$\Pi_{\text{ч}} = 1504652 * 0,8 = 1203722 \text{ грн.}$$

Рівень рентабельності проектного виробництва визначається за формулою:

$$P = 100\% * \Pi_{\text{ч}} / (C_{\text{опф}} + C_{\text{об}}), \quad (4.16)$$

де  $C_{\text{опф}}$  - вартість основних виробничих фондів, грн. ;

$C_{\text{об}}$  - вартість оборотних фондів, грн.

$$C_{\text{об}} = 7235246 \text{ руб.} = 100 * 1203722 / (1203722 + 1504652) = 44,45\%$$

Термін окупності капітальних вкладень визначається за формулою:

$$T = C_{\text{опф}} / Пч, \quad (4.17)$$

$$T = 1504652/1203722 = 1,24 \text{ років}$$

Коефіцієнт загальної ефективності капітальних вкладень є зворотною терміну окупності і визначається за формулою:

$$ЕКП = Пч / C_{\text{опф}}, \quad (4.18)$$

$$ЕКП = 1203722/1504652 = 0,8$$

Встановлення АСКТП дає змогу економити до 200 тис. грн. при виробництві 100 тонн виливків на рік, за рахунок зменшення фонду заробітної плати, економії енергоресурсів та поліпшення якості продукції.



## ВИСНОВКИ

1. За результатами досліджень розроблено критерій оптимізації комплексу ЛПТ, що поєднує в собі три фактори: продуктивність, витрати на виробництво і коефіцієнт первинного виходу виливків, а також низку обмежень з керуючими впливами. Задача оптимізації вирішена в напрямку знаходження таких значень керуючих впливів на температурні параметри процесу, дозування металу, швидкість пресування, зусилля запирання, при яких цільова функція досягає мінімальних значень. Задача оптимізації вирішена методом найскорішого спуску.

2. Дослідження технологічного процесу ЛПТ показали, що працюючі машини ЛПТ доцільно оснащувати інформаційними системами ЛПТ, які будуються за принципом замкнутих автоматизованих систем в основі якого лежить критерій оптимізації процесу шляхом регулювання параметрів процесу, мінімізації кількості бракованих виливків з підтриманням необхідної продуктивності.

3. Теоретичні розрахунки і експериментальні параметри температурного поля прес-форми показують, що тепловий режим об'єкта дослідження при ритмічній роботі машини ЛПТ квазісталий з періодично змінною теплопровідністю. В процесах акумуляції – деакумуляції теплоти бере участь тільки частина товщини прес-форми – активний шар, для покращення температурного режиму прес-форми та подовження її експлуатаційного часу запропоновано пристрій регулювання температури, що відрізняється від існуючих більш точним інтервалом температур, підвищеним часом реакції, а також підтриманням сталої температури форми в період технічних перерв в роботі.

4. Розроблено систему керування машиною ЛПТ, що забезпечує охоплення всіх технологічних операцій виробництва виливків, а саме підтримання необхідної температури розплаву в печі методом диференційного увімкнення індукторів, точного дозування при подачі порції металу в камеру пресування враховуючи та запобігаючи заморожуванню металу на стінки каналу

(зворотний зв'язок – величина прес-залишку), змикання прес-форми контролюючи натягнення на колонах, запресовки та підпресовки, затвердівання виливка в прес-формі, вилучення виливка, контроль якості виливка, очистка та змащення прес-форми.

5. Розроблено пристрій керування температурою прес-форм шляхом прокачування через канали форми теплоносія, що відрізняється від існуючих розширеними межами регулювання, точністю виміру температури, швидкодією та можливістю не тільки охолодження форми, а і підтримання її заданої температури в період між технологічними циклами.

6. Створено та описано математичну модель теплової обробки металозагрузки в ванні ІТП, що забезпечує високу точність отримання розплаву заданої температури. Модель може бути використана в інших теплових технологічних процесах, в яких шихта складається із твердої і рідкої частини. На основі моделі розроблено алгоритм керування температурою ІТП і включено в систему керування машиною ЛПТ.

7. Розроблено інформаційну систему для отримання якомога повніших даних про перебіг процесу, значення основних параметрів процесу, що вимірюються прямими та опосередкованими методами контролю із застосуванням сучасного обладнання. Встановлено, що існуючі машини доцільно оснащувати інформаційними системами, а ті що проектується – замкненими автоматичним системами керування.

8. Створено замкнену систему керування технологічним процесом ЛПТ, яка мінімізує участь оператора в перебігу процесу, в режимі он-лайн отримує дані від інформаційної системи, опрацьовує їх, та з допомогою керуючих впливів змінює параметри, приводячи їх до оптимальних величин, тим самим підвищує кількість придатних виливків.

9. Апробація системи та окремих контурів керування покращує техніко-економічні показники процесу і якість виробів. Використання системи дозволяє здійснити регулювання з вищою точністю, що приводить до збільшення продуктивності за рахунок зниження повернення виливків на 15 %, збільшення виходу придатного на 0,5 %. Також дозволяє знизити ресурсоспоживання та

оптимізувати роботу обладнання за рахунок раціонального розподілення робочого часу та цехових операцій.

10. Розроблено систему керування допоміжними операціями комплексу ЛПТ. Оснащення системи датчиками дози металу, об'єму відливки і масою прес-залишка дозволяє в автоматичному режимі відбраковувати пошкоджені виливки, а також зупиняти цикл виготовлення виливків при неповному їх вилученні з прес-форми.

11. Система передана для впровадження на ПАТ НВП «Смілянський електромеханічний завод», доцільність розробок підтверджено на ПрАТ «Вишнівський ливарний завод».

## Література

1. Гини Э.Ч. Технология литейного производства. Специальные виды литья / Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А.; под. ред. В.А.Рыбкина. – М.: Академия, 2005. – 352 с.
2. Антоневиц Я.К. Сучасний стан та перспективи розвитку процесу лиття під тиском / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. Збірник матеріалів конференції, Київ, 2012. – с. 48 – 54.
3. Паращенко В.М. Технология литья под давлением / Паращенко В.М., Рахманкулов М.М., Цисин Д.П.; М.: Металлургия, 1996. – 239 с.
4. Herman E.A. Die Casting Process Control / Herman E.A.; North American Die Casting Association, Arlington Heights, Illinois, 2012. – 76 p.
5. Литье под давлением / [Беккер М.Б., Заславский М.Л., Игнатенко Ю.Ф., Коротков Р.А., Невзоров В.Я.]. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
6. Зборщик А.М. Специальные виды литья / Зборщик А.М. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2007. – 158 с.
7. Березин Д.Т. Повышение эксплуатационной стойкости пресс-форм литья под давлением на основе анализа теплонапряженного состояния и моделирования процессов термоусталостного разрушения: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.04 «Ливарне виробництво» / Д.Т. Березин, Рыбинск, 2002. – 234 с.
8. B. Andersen Die-casting engineering. A hydraulic, thermal and mechanical process / B. Andersen. – Marcel Dekker, CRC Press, New York, 2004. – 400с.
9. Белопухов А.К. Технологические режимы литья под давлением / Белопухов А.К. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
10. Богушевский В.С. АСУ машинами лиття под. давлением [Автоматизация специальных способов литья: сб. науч. тр. ИПЛ.] / Богушевский В.С., Сорокин Н.А. – К.: АН УССР, ИПЛ, 1987. – 235 с.
11. Муромцев Ю.Л. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебное пособие / Муромцев Ю.Л., Муромцев Д.Ю. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.

12. Богушевский В.С. АСУТП машин литья под давлением / Богушевский В.С., Иванов В.Н., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. – НПК «Киевский институт автоматики», Киев, 1994. – 239 с.
13. Рыбкин В.А. Технология литейного производства. Специальные виды лиття / Рыбкин В.А. – М.: Академия, 2005. – 352 с.
14. Edward J. Vinarcik High integrity die casting processes / Edward J. Vinarcik. – John Willey & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2003. – 223 p.
15. H. Kaufmann Metallurgy and processing of high-integrity light metal pressure castings / H. Kaufmann, P. J. Uggowitzer. – Fachverlag Schiele & Schon, GmbH, Berlin 2007. – 273 p.
16. D. Apelian High Integrity Aluminum Die Casting: (alloys, Processes, and Melt Preparation) / D. Apelian, M. M. Makhlof. – North American Die Casting Association, 2004. – 136 p.
17. V. Nandakumar Process and Tool Design for the High Integrity Die Casting of Aluminum and Magnesium Alloys / Varun Nandakumar. – OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center, 2014. – 85 p.
18. Охотский В.Б. Гидродинамические процессы литья под давлением / Охотский В.Б. – Процессы лиття, №1, 2003. – с. 11-18.
19. Котлярский Ф.М. Определение интенсивности контактного теплообмена расплава с металлической формой / Котлярский Ф.М., Фиксен В.Н. – Процессы лиття, №2, 2001. – с. 23 – 25.
20. Моисеев Ю.В. Автоматизация специальных способов литья / Моисеев Ю.В., Личак А.И. – Процессы лиття, №1, 2008. – с. 31 – 37.
21. Голод В.М. Теория, компьютерный анализ и моделирование литейных процессов / Голод В.М., Савельев К.Д. – Литейщик России, 2011. – № 2. – С. 13– 16.
22. Антоневи́ч Я.К. Регулирование скорости пресс- поршня машин литья под давлением / Антоневи́ч Я.К., Богушевский В.С. – Металл и литье Украины, 2013. – №4. – С. 27 – 29.
23. Богушевський В.С. Контроль швидкості пресування в машинах лиття під тиском / Богушевський В.С., Меженський О.М., Сирбу Ю.І. –

Матеріали IV МНТК –Нові матеріали і технології в машинобудуванні,19-20.04.2012, Київ. – С. 115 – 117.

24. Богушевський В.С. Пристрій регулювання температури прес-форми / Богушевський В.С., Антоневич Я.К. – Київ: Матеріали V МНТК – Нові матеріали і технології в машинобудуванні, 2013. – С. 124 – 126.

25. Антоневич Я.К. Тепловая работа пресс-формы машины литья под давлением / Антоневич Я.К. Богушевський В.С. – Киев: Металл и литье Украины, 2012. – № 6. – С. 7– 9.

26. Жуков А.А. Повышение эффективности литья под давлением (ЛПД) / Жуков А.А., Постнова А.Д., Борисов В.А.и др. Литейщик России, 2008. – № 1. – С. 25 – 30.

27. Антоневич Я.К. Інформаційна АСУ машинами лиття під тиском / Антоневич Я.К., Богушевський В.С. Матеріали для роботи в екстремальних умовах-4, Матеріали МНТК. – К.: НТУУ –КПІ, 2012. – С. 206 – 210.

28. Антоневич Я.К. Система керування машинами лиття під тиском / Антоневич Я.К., Богушевський В.С. Наукові праці національного університету харчових технологій, 2013. – № 48. – С. 10 – 16.

29. Панов А.А. Управление автоматизированными производственными системами с использованием датчиков и микропроцессоров / Автоматизация и современные технологии,1992. – № 10. – С. 30 – 31.

30. Антоневич Я.К. Автоматизация техно- логического процесса литья под давлением / Антоневич Я.К., Богушевский В.С. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, 2012. – № 4. – С. 29 – 33.

31. Богушевський В.С. АСКТП комплексу лиття під тиском / Автоматизація виробничих процесів, 2001. – № 2 (13). – С. 53 – 55.

32. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования / Литейное производство, 2004. – №5 – с. 12 – 15.

33. Васькин В. Математическое моделирование и литейные технологии / В. Васькин, В. Крапотин, А. Обухов. – CADmaster,2002. – № 4. – с. 35-39.

34. С. Девятков Прогрессивные методы в литейной технологии – моделирование и анализ / Девятков С., Мешальников В. – CADmaster, 2003. – №2. – с. 19-23.

35. Богушевский В. С. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В. С. Богушевский, Л. Ф. Литвинов, Н. А. Рюмшин, В. В. Сорокин. – К.: НПК — Киевский институт автоматики, 1998. – 304 с.
36. Спиркин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Спиркин Н. А., Лавров В. В.. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с.
37. Аверченков В.И. Основы математического моделирования технических систем / Аверченков В.И., Фёдоров В.П., Хейфец М.Л. – Москва, ФЛИНТА, 2011. – 271 с.
38. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей / Мышкис А.Д. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
39. Самарский А.А. Математическое моделирование / Самарский А.А., Михайлов А.П. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
40. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика // Поспелов Д.А. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
41. Соснин О.М. Основы автоматизации технологических процессов и производств / Соснин О.М. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 240с.
42. Вальков В.М. Автоматизированные системы управления технологическими процессами / Вальков В.М., Вершин В.Е. – Л. Машиностроение, 1997. – 183 с.
43. Граблев А.Н. Машины и технологии литейного производства / Граблев А.Н, Болдин А.Н. – М.:МГИУ – 2010. – 228 с.
44. Богушевський В.С. Пристрій регулювання температури прес-форми / Богушевський В.С., Антоневич Я.К. – Матеріали V МНТК – Нові матеріали і технології в машинобудуванні, 2013. – Київ. – С. 124 – 126.
45. Патент України на корисну модель UA №85552, МПК F28C 3/04. Спосіб регулювання температури прес-форми машини лиття під тиском / Антоневич Я.К., Богушевський В.С.; заявник і патентотовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – U201305955, заявл. 13.05.2013; опубл. 25.11.2013 бюл. №22.
46. Богушевский В.С. Регулирование скорости пресс- поршня машин литья под давлением / Богушевский В.С., Антоневич Я.К. – Киев: Металл и литье Украины, 2013. – № 4. – С. 27 – 29.

47. Клюев А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие / Клюев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х., Клюев А.А. [Под ред. А. С. Клюева. - 2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.

48. Антоневи́ч Я.К. Прогнозування температурного режиму ванни плавильної печі / Антоневи́ч Я.К., Богушевський В.С. – Київ: Наукові вісті НТУУ „КПІ, 2012. – № 2. – С. 108 – 113.

49. Химельблау Д. Прикладное линейное программирование / Химельблау Д. [Пер. с англ. Под ред. Быховского]. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

50. Слажнев Н. А. Электромагнитное управление процессом заливки металлических расплавов из магнитовесовой установки в литейные формы / Слажнев Н. А., Богдан К. С. – Киев: Процессы литья, 2011. – №2, – с. 28 – 31.

51. Слажнев Н. А. Исследование динамических процессов при дозированной разливке алюминиевых расплавов из магнитовесовой литейной установки / Слажнев Н. А., Дубоделов В. И., Богдан К. С. – Киев: Процессы литья, 2011. – №4. – с. 9 – 14.

52. Слажнев Н.А. Магнитовесовая установка с микропроцессорным контролем и управлением дозированной разливкой алюминиевых расплавов / Слажнев Н.А., Дубоделов В.И., Богдан К.С. – Киев: Metallургические процессы и оборудование, 2012. – № 1 (27). – С. 36.

53. Дубоделов В.И. Автоматизация процессов приготовления, обработки и дозированной разливки алюминиевых расплавов из магнитовесовой литейной установки / Дубоделов В.И., Слажнев Н.А., Богдан К.С. – Киев: Metallургическая и горнорудная промышленность, 2012. – № 5. – С. 85-89.

54. Моисеев Ю.В. Перемешивание и циркуляция жидкого металла при его индукционной плавке и разливке / Моисеев Ю.В., Личак А.И., Слажнев Н.А. – Киев: Процессы литья, 2013. – № 2. – С. 32-39.

55. Авторское свидетельство №1235653 СССР, МПК В 22 D 39/06. Устройство для дозирования расплава / Сорокин Н.А., Богушевский В.С.; заявитель и патентообладатель Киевский институт автоматики. – № 3989980/22-02; заявл. 17.12.85; опубл. 07.05.87, Бюл. №1.



56. Меденников Е.М. Исследование работы вентиляционных каналов пресс-форм для литья под давлением / Литейное производство, 2005. – №9. – с. 13– 19.

57. Авторское свидетельство №1507535 СССР, МПК В 22 D 39/00 Устройство измерения и коррекции дозы металла в машине литья под давлением, Крейцер А.А., Присяжнюк И.В., Богушевский В.С., Церковный Н.С.; заявитель и патентообладатель Киевский институт автоматики. – № 4354004/23-02; заявл. 30.12.87; опубл. 15.09.89, Бюл. №34.

58. Литье под давлением / М.Б. Беккер, М.Л. Заславский, Ю.Ф. Игнатенко, Р.А. Коротков, В.Я. Невзоров. – [3-е изд., перераб. и доп.] – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

59. Богушевський В. С. Контроль температурного режиму конвертерної плавки / Богушевський В. С., Сергеева К.О. – Київ: Наукові вісті НТУУ «КП», 2009. – № 6. – С. 75– 80.

60. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов / Гольдфарб Э.М. – М.: Металлургия, 1967. – 440 с.

61. Глишков М.А. Тепловая работа сталеплавильной ванны / Глишков М.А. – М.: Металлургия, 1970. – 408 с.

62. Гидгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ / Гидгарц Д.А. – М.: Энергоиздат, 1984. – 135 с.

63. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи / Брокмайер К. – М.: Энергия, 1972. – 303 с.

64. Богушевский В.С. Теплообмен холодной металлозагрузки с расплавом в ванне печи / Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Лигоцкий И.Л. – Изв. АН СССР. Металлы, 1989. – № 3. – С. 15–20.

65. Тир Л.Л. О моделировании движения жидкого металла в индукционной плавильной печи / Тир Л.Л. – Магнитная гидродинамика, 1965. – № 4. – С. 120–124.

66. Коротченко А.Ю. Моделирование течения расплава в камере прессования при литье под давлением / Коротченко А.Ю., Коротченко И.А., Зарубин А.М. – Литейщик России, 2008. – №12. – с.19 – 22.

67. Горшков А.Г. Основы тензорного анализа и механика сплошной среды / Горшков А.Г., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. – Учебник, 2000 г. –

68. Кутателадзе С.С. Теплообмен и волны в газожидкостных системах / Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. – Новосибирск: Наука, 1984. – 302 с.

69. Вейник А.И. Термодинамика литейной формы / Вейник А.И. – М.: Машиностроение, 1968. – 336 с.

70. Рейхер А. Компьютерное моделирование как инструмент управления микропористостью в отливках, сокращения цикла проектирования и доводки пресс-форм литья под давлением / Рейхер А., Бархударов М., Вольнов И. – Литейщик России, 2008. – №12. – с. 24 – 30.

71. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Франк-Каменецкий Д.А. – М.: Наука, 1987. – 492 с.

72. Смитлз К.Дж. Металлы: Справ. / Смитлз К.Дж. [Пер. с англ. Под ред. Глазунова С.Г.]. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.

73. Партин И.А. Исследование теплообмена в ванне плавильной печи на огневой модели / Партин И.А., Смирнов А.А., Туранин С.Г. Цветные металлы, 1984. – № 11. – С. 76–78.

74. Конюхова Н.С. Совершенствование технологических смазок для литья под давлением с целью снижения канцерогенности: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.04 «Литейное производство» / Н.С. Конюхова. – Нижний Новгород, 2000. – 24 С.

75. Михальцов А.М. Разработка водоэмульсионных смазок для пресс-форм при литье под давлением / Михальцов А.М., Пивоварчик А.А., Розум В.А. – Литейное производство, 2006. – №3, – с. 26 – 30.

76. Противозадирные свойства смазок при литье под давлением алюминиевых сплавов / [Михальцов А. М., Пивоварчик А. А., Задруцкий С. П., Розум В. А., Либерг И. Г., Каргинов В. П.]. – Металл и литье украины, 2011. – о№6. – с. 17 – 22.

77. Чуркин А.Б. Оптимизация процессов формирования отливок при литье под регулируемым давлением: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.04 «Литейное производство» / А.Б Чуркин. – Екатеринбург, 2004. – 26 С.

78. Бадмажапова И.Б. Исследование процесса и разработка технологии рафинирования латуней с целью получения литых заготовок с

регламентируемым содержанием примесей кремния, алюминия и свинца: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.04 «Литейное производство» / И.Б. Бадмажапова. – Москва, МИСиС, 2009. – 25 С.

79. Повышение эффективности литья под давлением (ЛПД) / [А.А.Жуков, А.Д.Постнова, В.А.Борисов и др.]. – Литейщик России, 2008. – №1. – С.25 – 30.

80. Филипенко Е.В. Использование статистических методов анализа при мониторинге брака отливок в литейных цехах / Филипенко Е.В., Карпенко В.М., Самарай В.П. – Металл и литье Украины, 2011. – № 5 (216). – С.10 – 15.

81. Патент 8751 Україна, МПК (1995) B22D 17/32. Система управління машиною лиття під тиском / Церковницький М.С., Богушевський В. С., Сорокін М.О., Присяжнюк І.В.; заявник і патентовласник НПК —Київський інститут автоматики. – № su1468649; заявл. 31.08.1995; опубл. 30.09.96, Бюл. № 3, 1996.

82. Peter Beeley Foundry Technology / P. Beeley. – Butterworth-Heinemann, 2001. – 717p.

83. Seymour Katz, Craig F. Landefeld Foundry processes, their chemistry and physics / S. Katz, C. F. Landefeld. – Plenum Press, New York, 1988. – 525p.

84. Steve Hurst Metal casting appropriate technology in the small foundry / S. Hurst. – Intermediate technology publications, 1996. – 227p.

85. Галдин Н.М. Цветное литье / Галдин Н.М. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.

86. Граблев А.Н. Литейные сплавы и плавка / Граблев А.Н., Киселенко Л.Е., Михайлов Д.П. [Учебное пособие]. – М.: МГИУ, 2007 - 54с.

87. Ефимов В.А. Специальные виды литья / Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабичев В.Н. [Справочник]. – М.: Машиностроение, 1991. – 436с.

88. Иванов В.Н. Специальные виды литья / Иванов В.Н. [Учебное пособие]. – М.: МГИУ, 2007. – 316с.

89. Кнорре С.И. Основы проектирование литейных цехов и заводов / Кнорре С.И. – М.: Машиностроение, 1979 – 376 с.

90. Экономика и управление в машиностроении: [Учеб. пособие для студ. сред. проф. учеб. Зав., под ред. Н.Н. Кожевникова]. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 226 с.

91. Карпей Т.В. Экономика, организация и планирование

промышленного производства / Карпей Т.В. [Учебное пособие для учащихся ССУЗов. Издание 4-е испр. и доп.]. – Мн.: «Дизайн ПРО», 2004. – 153 с.

92. Адамчук В.В. Экономика труда: Учебник / В.В.Адамчук, Ю.П. Кокин, Р.А. Яковлев. – М.: ЗАО «Финстат-информ», 1999 г. – 211 с.

93. Вороненко В.П. Машиностроительное производство: Учеб. для сред. спец. учеб. заведений / Вороненко В.П., Схиртладзе А.Г., Брюханов В.Н. [Под ред. Ю.М. Соломенцева]. – М.: Высшая школа, Изд. «Академия», 2001. – 189 с.

94. Антоневи́ч Я.К. Принципи побудови та перспективи розвитку АСКТП машин лиття під тиском / Антоневи́ч Я.К. – Матеріали МНТК «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», 2012р. – С.113-114.

95. Антоневи́ч Я.К. Комп'ютерне керування машиною лиття під тиском / Антоневи́ч Я.К. – Матеріали МНТК «Інформаційні технології в освіті, науці та техніці (ІТОНТ-2012)».– ЧДТУ, 2012. – С.56-57.

96. Богушевський В.С. Система керування машинами лиття під тиском / Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. – Матеріали міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2012». – К.: НУХТ, 2012. – С.151-152.

97. Антоневи́ч Я.К. Управління дозуванням розплаву в процесі лиття під тиском / Антоневи́ч Я.К. – Матеріали ІХ міжнародної науково – практичної конференції: «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», 2013. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С.31-35.

98. Антоневи́ч Я.К. Управление скоростью пресс-поршня в машинах лиття под давлением / Антоневи́ч Я.К. – Материалы ІХ международной научно-практической конференции «Литье – 2013». – Запоріжжя, 2013. – С. 20-22.

99. Богушевський В.С. Інформаційна АСУ машинами лиття під тиском / Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. – Материалы ІІ МНП конференції «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика, экология». – Киев, 2013. – С. 35-36.

100. Богушевський В.С. Пристрій регулювання температури прес-форми / Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. – Матеріали V МНТК «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». – Київ, 2013. – С.124-126.

101. Богушевський В.С. Пристрій вимірювання і корекції дози металу в

машині лиття під тиском / Богусhevський В.С., Антоневич Я.К. – Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції "Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра". – Київ, 2014. – С. 68-72.

102. Богусhevський В.С. Устройство измерения и коррекции дозы в машине литья под давлением / Богусhevський В.С., Антоневич Я.К., Антоневич О.О. – X МНПК ЛИТЬЕ 2014. – Запорожье, 2014. – С. 23-24.

103. Богусhevський В.С. Система керування машиною лиття під тиском / Богусhevський В.С., Антоневич Я.К., Антоневич О.О. – XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, КрНУ, 2014. – С. 223-224.

104. Богусhevський В.С., Антоневич Я.К., Антоневич О.О. Розробка гнучкої автоматичної ділянки лиття під тиском // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2015. №5.– С. 64 – 72.

105. Богусhevський В.С. Система управління машиною литья под давлением / Богусhevський В.С., Антоневич Я.К. – Вестник ГГТУ им. Сухого, Гомель, Республика Беларусь, № 2(57), 2014. – С.3-7.

106. Богусhevський В.С. Критерій оптимального управління машиною лиття під тиском / Богусhevський В.С., Антоневич Я.К. – Матеріали шостої Міжнародної НТК конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». – Київ, 2014. – С. 144-146.

107. Антоневич Я.К. Система автоматизації машин лиття під тиском / Антоневич Я.К. – 5-та науково-практична конференція молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні» присвячена 80-й річниці від дня народження відомого вченого-металурга Переломи В. О. – Київ, ФТІМС НАН України, 2014. – С. 12-14.